

**ANALISIS POTENSI ENERGI ANGIN SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN (STUDI KASUS :  
BLANGKEJERAN KABUPATEN GAYO LUES ACEH)**

**TESIS**

*Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Magister Teknik Elektro  
Dalam Bidang Management Energi Listrik*

**Oleh :**

**SURIANTO**  
**2020080015**



**UMSU**  
Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
MEDAN  
2023**

## PENGESAHAN PEMBIMBING

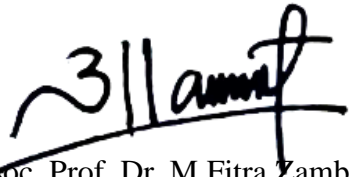
Nama : SURIANTO  
NPM : 2020080015  
Prodi/Konsentrasi : Magister Teknik Elektro/Managemen Energi Listrik  
Judul Thesis : Analisis Potensi Energi Angin Sebagai Energi Alternatif  
Pembangkit Listrik Tenaga Angin (Studi Kasus : Blangkejeran  
Kabupaten Gayo Lues Aceh)

Pengesahan Tesis

Medan, 15 Juni 2023

Komisi Pembimbing

Pembimbing I



Assoc. Prof. Dr. M Fitra Zambak, M.Sc

Pembimbing II



Dr. Ade Faisal

Diketahui :

Direktur

Prof. Dr. Triono Eddy, S.H, M.Hum

Ketua Program Studi

Assoc. Prof. Dr. Ir. Suwarno. M.T

## PENGESAHAN

### ANALISIS POTENSI ENERGI ANGIN SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN (STUDI KASUS : BLANGKEJERAN KABUPATEN GAYO LUES ACEH)


“Tesis ini Telah Dipertahankan Dihadapan Panitia Penguji”

Yang Dibentuk Oleh Magister Teknik Elektro PPs. UMSU dan Dinyatakan Lulus  
Dalam Ujian,

Pada Hari Jum'at, 17 Maret 2023

#### PANITIA PENGUJI

1. Assoc. Prof. Dr. Ir. Suwarno, M.T  
Ketua

1.....  


2. Rohana, S.T, M.T  
Sekretaris

2.....  


3. Ir. Eddy Warman, M.T  
Anggota

3.....  


## **PERNYATAAN KEASLIAN TESIS**

### **ANALISIS POTENSI ENERGI ANGIN SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN (STUDI KASUS : BLANGKEJERAN KABUPATEN GAYO LUES ACEH)**

Dengan ini penulis menyatakan bahwa :

1. Tesis ini disusun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister pada Program Magister Ilmu Komunikasi Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara benar merupakan hasil karya peneliti sendiri.
2. Tesis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara maupun di perguruan tinggi lain.
3. Tesis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Komisi Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
4. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya. Apabila di kemudian hari ternyata ditemukan seluruh atau sebagian tesis ini bukan hasil karya penulis sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, penulis bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang penulis sandang dan sanksi-sanksi lainnya sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Medan, 15 Juli 2023  
Penulis

**SURIANTO**

**ANALISIS POTENSI ENERGI ANGIN SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN (STUDI KASUS :  
BLANGKEJERAN KABUPATEN GAYO LUES ACEH)**

**Surianto  
NPM : 2020080015**

**ABSTRAK**

Kecamatan Blangkejeren adalah daerah yang berada pada Kabupaten Gayo Lues merupakan daerah yang terletak pada di Provinsi Aceh. Daerah ini merupakan daerah yang dikelilingi oleh perbukitan dan dikelilingi oleh perbukitan. Pada kecamatan Blangkejeren ini masih minim pemanfaatan energi baru terbarukan kususnya Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Pemanfaatan energi baru terbarukan PLTB merupakan suatu hal yang sangat baru apabila terpasang pada Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues ini. Namun pemanfaatan PLTB membutuhkan analisis terlebih dahulu tentang potensi yang ada pada daerah yang ingin dipasang PLTB. Hal ini dikarenakan tingkat ekonomi untuk pemasangan PLTB relatif mahal. Maka apabila pemanfaatan PLTB tidak efektif dan efisien biaya yang dikeluarkan dengan nilai yang cukup tinggi tidak dapat bekerja dengan baik. Dari data yang diperoleh dapat dilihat dari 6 titik lokasi penelitian kecepatan angin yang dihasilkan oleh masing – masing tempat relatif kecil yaitu tidak mencapai 2 m/s. rata – rata dari data sampel yang diambil yaitu hanya sebesar 1,176 m/s. Dengan rata – rata kecepatan angin yang relatif kecil, maka daya spesifik yang dihasilkan juga relatif kecil memiliki rata – rata sebesar 1.01 Watt/m<sup>2</sup>. Dengan masa udara rata – rata 128,56 kg/s dan energi kinetik yang dihasilkan sebesar 98,84 Joule. Maka daya yang dapat dibangkitkan oleh turbin yang diasumsikan berkapasitas 10 kW hanya sebesar 98,76 Watt. Pembangkit listrik tenaga angin pada kecamatan blangkejeren aceh belum memiliki potensi angin yang baik dikarenakan tingkat kecepatan angin dan energi yang dihasilkan relatif kecil.

Kata Kunci : Energi Angin, PLTB, Potensi

**ANALYSIS OF WIND ENERGY POTENTIAL AS AN ALTERNATIVE  
ENERGY FOR WIND POWER GENERATION (CASE STUDY:  
BLANGKEJERAN, GAYO LUES ACEH DISTRICT)**

**Surianto  
NPM : 2020080015**

**ABSTRACT**

*Blangkejeren District is an area that is in Gayo Lues Regency which is an area located in Aceh Province. This area is an area surrounded by hills and surrounded by hills. In the Blangkejeren sub-district, there is still minimal utilization of new renewable energy, especially the wind-powered electricity generator (PLTB). The utilization of new renewable energy PLTB is something very new when it is installed in Blangkejeren District, Gayo Lues Regency. However, the utilization of PLTB requires prior analysis of the potential that exists in the area where the PLTB is to be installed. This is because the economic level for PLTB installation is relatively expensive. So if the use of PLTB is not effective and cost-efficient, it will not work properly. From the data obtained, it can be seen that from the 6 research locations, the wind speed generated by each place is relatively small, not reaching 2 m/s. the average of the sample data taken is only 1.176 m/s. With a relatively small average wind speed, the specific power generated is also relatively small, having an average of 1.01 Watt/m<sup>2</sup>. With an average air mass of 128.56 kg/s and a generated kinetic energy of 98.84 Joules. Then the power that can be generated by the turbine which is assumed to have a capacity of 10 kW is only 98.76 Watt. The wind power plant in the Aceh Blangkejeren sub-district does not yet have good wind potential because the level of wind speed and the energy produced is relatively small.*

*Keywords: Wind Energy, PLTB, Potentia*

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Identifikasi Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	4
1.4. Rumusan Penelitian .....	4
1.5. Tujuan Penelitian .....	5
1.6. Manfaat Penelitian .....	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1. Landasan Teori .....	6
2.2.1. Energi Terbarukan .....	6
2.2.2. Energi Angin .....	7
2.2.2.1 Energi Kinetik Angin .....	8
2.2.2.2 Prinsip Kerja Konstruksi Turbin Angin .....	10
2.2.2.3 Jenis – Jenis Turbin Angin.....	12
2.2.3. PLTB .....	15
2.2.3.1 Inverter .....	20
2.2.3.2 Charger Controller .....	25
2.2.3.3 Baterai .....	26
2.2.3.4 Generator DC .....	29
2.2.3.5 Konfigurasi PLTB.....	32
2.2.4. Beban Listrik .....	33
2.2.5. Tarif Listrik .....	37
2.2.6. Analisis Potensi PLTB .....	42
2.2.7. Homer .....	46

2.2.8. Kajian Pustaka Relevan.....	50
2.2.9. Kerangka Berfikir.....	57
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>	<b>59</b>
3.1 Waktu dan Tempat.....	59
3.2 Tahapan Percobaan.....	59
3.3 Alur Penelitian.....	60
3.4 Teknik Pengambilan Data .....	61
3.5 Teknik Analisis.....	62
3.6 Flowchart.....	63
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>64</b>
4.1 Potensi Kecepatan Angin.....	64
4.1.1. Kecepatan Angin Pada Desa .....	64
4.1.2. Potensi Daya Spesifik.....	72
4.2 Pemilihan Teknologi Turbin.....	75
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>	<b>82</b>
5.1 Kesimpulan.....	82
5.2 Saran .....	82

## DAFTAR PUSTAKA



## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Sebagai Negara berkembang, Indonesia memiliki kebutuhan energi yang terus meningkat. Kenaikan rata-rata kebutuhan energi ini mencapai 7 % pertahun. Sebagiaian besar atau sekitar 75 % dari kebutuhan energi ini dipasok oleh bahan bakar fosil seperti batu bara dan minyak bumi. Akan tetapi, ketersediaan bahan bakar fosil terus berkurang dan menimbulkan polusi yang berbahaya bagi lingkungan. Mengingat kebutuhan energi yang terus meningkat dan mendesak serta pentingnya menjaga kelestarian lingkungan, maka pemanfaatan energi terbarukan seperti energi matahari, panas bumi, biomassa dan angin menjadi solusi yang tepat untuk memenuhi kebutuhan energi ini.

Salah satu kebutuhan energi yang sangat dasar adalah energi listrik. Energi listrik memegang peranan penting dalam memenuhi kebutuhan hidup. Kebutuhan energi listrik diperkirakan mengalami peningkatan rata-rata 6,5% pertahun hingga tahun 2020. Hal ini karena penggunaan jumlah peralatan elektronika yang mengkonsumsi energi listrik semakin hari semakin bertambah mulai dari sektor rumah tangga, instansi pemerintah hingga sektor industri. Sehingga menyebabkan kebutuhan energi listrik semakin besar.

Demikian juga kebutuhan energi listrik di Kabupaten Gayo Lues Aceh setiap tahun selalu bertambah yang disebabkan oleh bertambahnya infrastruktur sarana prasarana masyarakat. Selama ini kebutuhan energi listrik dipasok oleh Perusahaan

Listrik Negara (PLN). Oleh karena itu untuk mengurangi ketergantungan terhadap PLN, Masyarakat harus mampu memanfaatkan energi terbarukan sebagai energi alternatif. Salah satu sumber energi alternatif yang jumlahnya sangat melimpah dan ramah lingkungan adalah energi angin.

Angin adalah sumber energi yang tersedia cukup berlimpah di alam. Pemanfaatannya telah dimulai sejak tahun 5000 SM untuk menggerakkan baling-baling perahu di Sungai Nil. Tahun 200 SM, Cina telah memanfaatkan energi angin untuk pompa air, dan di Timur Tengah telah dimanfaatkan untuk menggiling biji-bijian. Pada abad ke-20, energi angin telah banyak dimanfaatkan untuk pengolahan makanan, pompa air, dan pembangkit listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLT Angin) merupakan pembangkit listrik yang sangat ramah lingkungan. Penerapannya bisa dalam bentuk *wind farm* ataupun *stand alone*, baik yang terhubung ke dalam *grid* maupun tidak. PLT Angin sangat cocok diterapkan pada lokasi terpencil maupun yang telah mempunyai grid. Keberadaan dan kelangsungan suatu PLT Angin ditentukan oleh pemilihan lokasi (*sitting*) yang tepat berdasarkan data angin yang akurat dan berlaku sepanjang waktu guna (*service life*) mesin turbin angin. Oleh sebab itu studi potensi angin sepanjang tahun pada lokasi yang mempunyai potensi merupakan sesuatu yang mutlak dilakukan sebelum diputuskan untuk membangun PLT Angin.

Untuk membuat ataupun menggunakan pembangkit listrik tenaga angin memerlukan biaya yang cukup mahal mulai dari turbin, baterai, charger controller, inverter dan generator. Maka dari itu sebelum menggunakan pembangkit listrik tenaga angin alangkah lebih baik untuk tempat lokasi pemasangan dianalisa terlebih dahulu

potensi energi angin yang dihasilkan. Hal ini bertujuan untuk menguji kelayakan lokasi tersebut untuk dipasang pembangkit listrik tenaga angin.

Berdasarkan beberapa referensi penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian penulis dengan judul Analisis Potensi Energi Angin Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik Tenaga Angin (Studi Kasus : Blangkejeran Kabupaten Gayo Lues Aceh).

## **1.2 Identifikasi Masalah**

Dari latar belakang yang telah dipaparkan adapun identifikasi masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Kecamatan Blangkejeran adalah daerah yang berada pada Kabupaten Gayo Lues merupakan daerah yang terletak pada di Provinsi Aceh. Daerah ini merupakan daerah yang dikelilingi oleh perbukitan dan dikelilingi oleh perbukitan. Pada kecamatan Blangkejeran ini masih minim pemanfaatan energi baru terbarukan kusus nya Pembangkit Listri Tenaga Bayu (PLTB)
2. Pemanfaatan energi baru terbarukan PLTB merupakan suatu hal yang sangat baru apabila terpasang pada Kecamatan Blangkejeran Kabupaten Gayo Lues ini. Namun pemanfaatan PLTB membutuhkan analisis terlebih dahulu tentang potensi yang ada pada daerah yang ingin dipasang PLTB. Hal ini dikarenakan tingkat ekonomi untuk pemasangan PLTB relatif mahal. Maka apabila pemanfaatan PLTB tidak efektif dan efisien biaya yang dikeluarkan dengan nilai yang cukup tinggi tidak dapat bekerja dengan baik.

3. Maka perlunya terlebih dahulu menganalisis potensi energi angin yang ada pada lokasi penelitian sebelum pemanfaatan PLTB tersebut.

### **1.3 Batasan Masalah**

Untuk membatasi ruang lingkup penelitian yang dilakukan maka perlunya membatasi proses penelitian agar tetap sesuai dengan judul yang dibahas. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini berfokus pada pembahasan potensi angin pada kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues, dimana potensi yang diambil pada lokasi yaitu desa – desa yang ada pada kecamatan Gayo Lues. Kecamatan ini terdiri dari 12 Desa namun sebagai sampel akan diambil data sebanyak 6 Desa.
2. Penelitian ini tidak membahas sistem keamanan pada PLTB, hanya terfokus pada potensi energi angin untuk pemanfaatan PLTB pada Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues.

### **1.4 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dari judul yang ingin diajukan adalah :

1. Brapa rata – rata kecepatan angin pada Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues?
2. Bagaimana daya yang dihasilkan dari energi angin pada Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues ?

3. Bagaimana Potensi Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues Aceh apabila dipasang pembangkit listrik tenaga angin?

### **1.5 Tujuan Penelitian**

1. Mengetahui Brapa kecepatan angin pada masing – masing Desa pada Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues?
2. Menganalisis daya yang dihasilkan dari energi angin pada Desa yang paling berpotensi di Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues ?
3. Bagaimana Potensi Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues Aceh apabila dipasang pembangkit listrik tenaga angin?

### **1.6 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini meliputi dua aspek yaitu, aspek tekno-ekonomi dan juga lingkungan. Aspek dari tekno-ekonomi yaitu penggunaan teknologi yang terbarukan dan ekonomis. Sedangkan untuk aspek lingkungan yaitu memberikan informasi pada warga desa akan penting nya energi baru terbarukan.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Landasan Teori**

##### **2.2.1 Energi Terbarukan**

Energi Baru dan Terbarukan (EBT) berdasarkan sifat pasokan dayanya, dapat di klasifikasikan menjadi intermiten dan primer. Intermiten adalah energi yang tidak dapat memberikan daya 24 jam/hari atau secara kontinyu seperti angin dan surya. Sementara primer adalah yang sifatnya dapat di andalkan untuk mensuplai daya secara kontinyu 24 jam/hari, atau paling tidak faktor ketersediaannya bisa direncanakan secara akurat seperti : air, panas bumi, biomassa dan nuklir. [1]

Energi listrik merupakan kebutuhan dasar manusia, yang terus meningkat sejalan dengan tingkat kesejahteraannya. Berbicara mengenai pemenuhan kebutuhan listrik masyarakat sangat erat kaitannya dengan rasio elektrifikasi. [1]

Energi angin adalah udara yang bergerak yang secara tidak langsung merupakan energi yang berasal dari matahari, karena angin dipengaruhi oleh pemanasan yang dilakukan oleh matahari secara tidak merata di permukaan bumi oleh matahari. Lapisan udara yang menghangatkan mengakibatkan perbedaan tekanan udara di atmosfer. [2]

Energi terbarukan merupakan energi yang berasal dari alam disekitar kita, beberapa contoh energi terbarukan adalah angin, air, geothermal, biomas, dan matahari. Disebut energi terbarukan karena energi tersebut dapat memperbaharui energi itu sendiri dalam kurun waktu yang singkat dan sangat berbeda dengan energi fosil yang memerlukan waktu bertahun-tahun agar terbentuk energi lagi. Di Indonesia sendiri

potensi energi baru terbarukan sangat besar dikarenakan iklim di Indonesia sangat bagus untuk energi terbarukan contohnya adalah matahari, karena di Indonesia cukup sering terpapar sinar matahari karena terbagi cuacanya terbagi hanya menjadi 2 iklim dalam setahun.

Energi terbarukan sangat ramah lingkungan Karena tidak menghasilkan emisi gas buang dan juga limbah sehingga dapat mengurangi pencemaran lingkungan hidup, beberapa wilayah di Indonesia telah mengembangkan energi terbarukan contohnya pada pesisir pantai yang dapat menggunakan panas sinar matahari dan menggunakan angin sebagai energi alternatif disamping menggunakan energi dari *supplay* PLN. [3]

### **2.2.2. Energi Angin**

Secara sederhana energi potensial yang terdapat pada angin dapat memutarakan blade-blade yang terdapat pada kincir angin, dimana blade-blade ini terhubung dengan poros dan memutarakan poros yang telah terhubung dengan generator dan menimbulkan arus listrik. Model sederhana dari turbin angin mengambil dasar teori dari momentum, angin dengan kecepatan tertentu menabrak rotor yang memiliki performa sayap atau propeller. Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai PLTB yang menghasilkan energi listrik dibandingkan dengan jenis sumber energi terbarukan lainnya. [4]

Dalam model sederhana, dimana memungkinkan *newtonian mechanics* digunakan, aliran diasumsikan steady dan mendatar, udara diasumsikan *incompressible* dan *inviscid*, dan aliran downstream (aliran setelah melalui rotor)

diasumsikan konstan disekeliling bagian streamtube dengan tidak ada diskontinuitas tekanan.

### **2.2.2.1. Energi Kinetik Angin**

Salah satu isu terpenting dalam pengembangan energi angin adalah pengukurannya. Metode pengukuran yang tepat harus dilakukan agar data energi angin dapat diperoleh secara valid, khususnya kecepatan angin. Ini sangat penting untuk pemilihan teknologi yang akan digunakan untuk menghasilkan energi listrik. [5] Kondisi cuaca yang selalu berubah sehingga kecepatan angin yang diperoleh tidak konstan dan cenderung rendah mengakibatkan energi listrik yang dihasilkan kurang optimal. [22]

Energi angin merupakan energi alternatif yang mempunyai prospek baik karena selalu tersedia di alam, dan merupakan sumber energi yang bersih dan terbarukan kembali. Proses pemanfaatan energi melalui dua tahapan konversi yaitu : [23]

1. Aliran angin akan menggerakkan rotor (baling-baling) yang menyebabkan rotor berputar selaras dengan angin bertiup.
2. Putaran rotor dihubungkan dengan generator sehingga dapat dihasilkan listrik.

Dengan demikian energi angin merupakan energi kinetik atau energi yang disebabkan oleh kecepatan angin untuk dimanfaatkan memutar sudu - sudu kincir angin. Untuk memanfaatkan energi angin menjadi energi listrik maka langkah pertama yang harus dilakukan adalah menghitung energi angin dengan rumus : [23]



$$E = \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

E : energi kinetic (joule)

M : Masa udara (Kg)

V : Kecepatan Angin (m/det)

Untuk mendapatkan massa udara dimisalkan satu blok udara mempunyai penampang dengan luas  $A$  ( $m^2$ ), dan bergerak dengan kecepatan  $v$  (m/det), maka massa udara adalah yang melewati suatu tempat adalah :

$$m = A.v.\rho \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana :

$m$  : massa udara yang mengaalir (kg/det)

$A$  : luas penampang ( $m^2$ )

$V$  : kecepatan angin (m/det)

$\rho$  : kerapatan udara ( $kg/m^3$ )

dengan persamaan (2.1) dan (2.2) dapat dihitung besar daya yang dihasilkan energi angin yaitu : [23]

Mencari Daya Spesifik :

$$P_s = \frac{1}{2}.v^3.\rho \dots\dots\dots(2.3)$$

Daya yang dihasilkan Turbin :

$$P = \frac{1}{2}A.v^3.\rho \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana :

- $P_s$  : daya spesifik (Watt/m<sup>2</sup>)  
 $P$  : daya yang dapat dihasilkan turbin (Watt)  
 $A$  : luas penampang (m<sup>2</sup>)  
 $V$  : kecepatan angin (m/det)  
 $\rho$  : kerapatan udara 1,2 (kg/m<sup>3</sup>)

#### 2.2.2.2 Prinsip Kerja dan Kontruksi Turbin Angin

Turbin angin atau dalam bahasa sederhana kincir angin merupakan turbin yang digerakkan oleh angin, yaitu udara yang bergerak di atas permukaan bumi. Sudah sejak dahulu angin berjasa bagi kehidupan manusia, salah satunya adalah para nelayan. Selain itu, turbin angin pada awalnya juga dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, memompa air dan menggiling jagung. Penggunaan turbin angin terus mengalami perkembangan guna memanfaatkan energi angin secara efektif, terutama pada daerah - daerah dengan aliran angin yang relatif tinggi sepanjang tahun. [5]

Sistem pembangkit listrik tenaga angin ini merupakan pembangkit listrik yang menggunakan turbin angin (wind turbine) sebagai peralatan utamanya. Dalam skala utility memiliki berbagai ukuran, dari 100 kilowatt sampai dengan beberapa megawatt. Turbin besar dikelompokkan bersama-sama ke arah angin, yang memberikan kekuatan massal ke jaringan listrik. Turbin kecil tunggal, di bawah 100 kilowatt dan digunakan pada rumah, telekomunikasi, atau pemompaan air. Turbin kecil

kadang-kadang digunakan dalam kaitannya dengan generator diesel, baterai dan sistem fotovoltaik.

Sistem ini disebut sistem angin hibrid dan sering digunakan di lokasi terpencil di luar jaringan, di mana tidak tersedia koneksi ke jaringan utilitas. Tenaga angin modern dihasilkan dalam bentuk listrik dengan merubah rotasi pisau turbin menjadi arus listrik menggunakan generator listrik. Kincir dengan energi angin digunakan untuk memutar peralatan mekanik dalam melakukan kerja fisik, seperti memompa air atau menyalakan lampu. Daya yang dihasilkan oleh turbin angin tergantung pada diameter pada sudu. Semakin besar diameter, maka daya yang dihasilkan semakin besar.



Gambar 2.1 Turbin Angin [6]

Turbin angin sekarang ini banyak digunakan untuk mengakomodasi listrik masyarakat dengan menggunakan konversi energi dengan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbarui yaitu angin. Cara kerja pembangkit listrik tenaga bayu/angin

cukup sederhana. Energi angin yang memutar turbin angin, diteruskan untuk memutar rotor pada generator dibelakang bagian turbin angin, sehingga akan menghasilkan energi listrik. Energi listrik ini biasanya akan disimpan dalam baterai sebelum dimanfaatkan. Banyaknya baterai disesuaikan dengan jumlah daya yang dibutuhkan dalam instalasi listrik rumah tangga atau instansi.

### **2.2.2.3 Jenis Turbin Angin**

Dalam perkembangannya turbin angin dibagi menjadi dua jenis turbin angin Propeller dan turbin angin Darrieus. Kedua jenis turbin inilah yang kini memperoleh perhatian besar untuk dikembangkan. Pemanfaatannya yang umum sekarang sudah digunakan adalah untuk memompa air dan pembangkit tenaga listrik. Turbin angin terdiri atas dua jenis, yaitu :

#### **1. Turbin Angin Sumbu Horizontal**

Turbin angin Propeller adalah jenis turbin angin dengan poros horizontal seperti baling-baling pesawat terbang pada umumnya. Turbin angin ini harus diarahkan sesuai dengan arah angin yang paling tinggi kecepatannya.



Gambar 2.2. Turbin Angin Horizontal [7]

Pembangkit listrik tenaga angin (PLTA) adalah suatu teknologi pembangkit listrik yang merubah potensi angin menjadi energi listrik. Angin adalah udara yang bergerak/mengalir, sehingga memiliki kecepatan, tenaga dan arah. Penyebab dari pergerakan ini adalah pemanasan bumi oleh radiasi matahari. Daya yang dihasilkan energi angin dirumuskan sebagai berikut: [8]

$$P = k.F.A.E. v^3 \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan P = daya (kw)

K = konstanta =  $1,37.10^{-5}$

F = faktor = 0,5926

E = efisiensi rotor dan peralatan lain

v = kecepatan angin (m/det)

Untuk mendapatkan daya efektif dari angin yang mungkin dihasilkan dari suatu kincir adalah :

$$E_a = .C. \rho .A.v^3 \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana

$E_a$  : daya efektif yang di hasilkan kincir ( watt )

$C$  : konstanta Betz konstanta harganya  $16/27$  (= 59,3%)

$A$  : luas sapuan turbin ( $m^2$  )

$V$  : kecepatan angin (m/s)

## 2. Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal/tegak memiliki sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Generator dan gearbox turbin jenis ini bisa ditempatkan didekat tanah, sehingga menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. Desain turbin ini menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berdenyut. Drag (gaya yang menahan pergerakan) sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas) bisa saja tercipta saat kincir berputar. Drag sulit dipasang diatas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat ia diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan.



Gambar 2.3 Turbin Vertikal [9]

Berdasarkan data-data pada PLTB di Indonesia, teknologi turbin angin skala besar dapat bekerja dengan baik pada kecepatan antara 5 – 20 meter/detik. Kurang dari 5 m/s lebih sesuai untuk diubah menjadi energi mekanik atau pembangkit tenaga angin skala kecil. [25]

### 2.2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (Angin)

PLTB secara umum adalah suatu sistem pembangkit listrik yang dapat mengonversikan energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik. Secara umum PLTB terbagi menjadi 4 bagian, yaitu rotor turbin, gearbox, generator dan pembebanan. Prinsip kerja PLTB adalah mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik dari putaran baling – baling yang dapat memutar rotor. Putaran dari rotor relatif lambat sehingga PLTB secara umum menggunakan gearbox untuk mempercepat laju putaran rotor. [10]

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan Windmill.

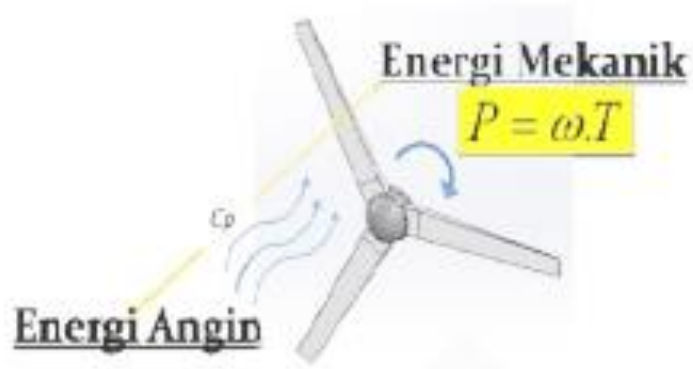
Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Walaupun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (Contoh: PLTD, PLTU, dll), turbin angin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak terbaharui (Contoh: batubara, minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik.

Turbin angin merupakan alat konversi energi angin menjadi energi mekanik. Energi angin ( $P_{wind}$ ) ini sendiri merupakan hasil dari setengah kali massa jenis udara ( $\rho$ ) dengan luas penampang cakupan dari turbin angin ( $A$ ) dan pangkat tiga dari kecepatan anginnya ( $V^3$ ). Jadi, sedikit saja selisih kecepatan anginnya, maka perbedaan energi yang dihasilkannya dapat berkali lipat besarnya.

Setiap sistem pasti memiliki suatu tingkat efisiensi kerja karena hampir tidak ada sistem yang mampu bekerja sempurna, seperti halnya turbin angin ini. Oleh karena itu, untuk mendapatkan Energi Mekanik dari hasil turbin ini maka perlu diperhitungkan juga nilai efisiensi turbin ( $C_p$ ). Energi Mekanik dari turbin ini berupa kecepatan



putaran bilah II - 18 turbin ( $\omega$ ) dan torsi,  $T$ , (besar gaya yang diberikan pada suatu panjang lengan beban/blade) [11].



Gambar 2.4 Skema Aliran Konversi Angin [7]

PLTB adalah suatu teknologi pembangkit listrik yang merubah potensi angin menjadi energi listrik. Angin merupakan udara yang bergerak/mengalir, sehingga memiliki kecepatan, tenaga dan arah. Penyebab dari pergerakan ini adalah pemanasan bumi oleh radiasi matahari. Daya yang dihasilkan energi angin dirumuskan sebagai berikut : [11]

$$P = k.F.A.E. v^3 \quad (2.1)$$

Dimana :

$p$  = daya (kw)

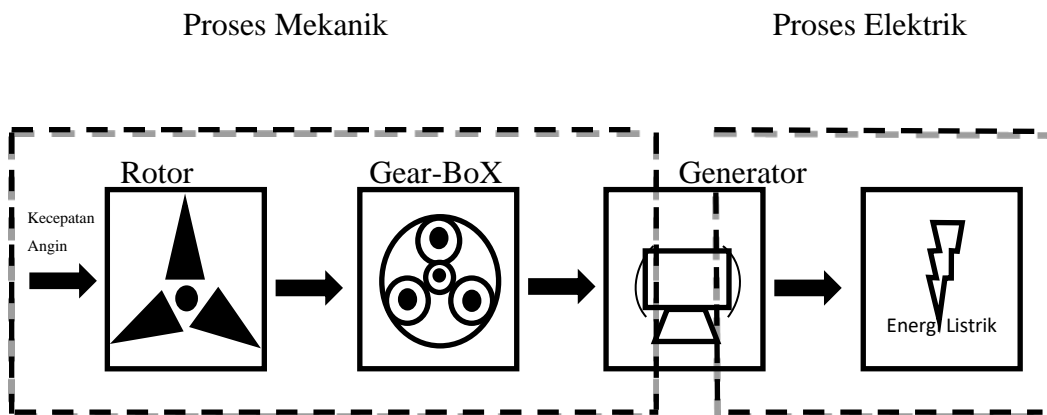
$K$  = Konstanta =  $1,37.10^{-5}$

$F$  = faktor = 0,5926

$E$  = efisiensi rotor dan peralatan lain

$v = \text{kecepatan angin (m/det)}$

PLTB secara umum adalah suatu sistem pembangkit listrik yang dapat mengkonversikan energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik. Secara umum PLTB terbagi menjadi 4 bagian, yaitu rotor turbin, *gearbox*, generator dan pembebanan. Prinsip kerja PLTB adalah mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik dari putaran baling-baling yang dapat memutar rotor. Putaran rotor relatif lambat sehingga PLTB secara umum menggunakan *gearbox* untuk mempercepat laju putaran rotor. Setelah itu generator mengubah putaran dari *gearbox* tersebut mejadi energi listrik



Gambar 2.5 PLTB secara umum

Energi kinetik pada suatu turbin angin dapat dirumuskan seperti pada persamaan berikut :

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.2)$$

Dimana :

$E_k$  = Energi kinetik (*joule*),

$m$  = massa udara (kg),

$v$  = kecepatan angin (m/s).

Laju aliran massa dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$m = \rho Av, \quad (2.3)$$

Dimana:

$\rho$  = massa jenis angin (kg/m<sup>3</sup>)

$$= 1,225 \text{ kg/m}^3$$

$A$  = luas penampang turbin (m<sup>2</sup>)

$$= \pi r^2$$

Dari persamaan (2.4) dan (2.5) dapat diperoleh daya angin seperti persamaan berikut :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.4)$$

Dimana :

$P_a$  = daya angin (watt).

Persamaan (2.5) merupakan teori perhitungan daya pada turbin angin yang hanya memperhitungkan luas penampang turbin angin yang menyapu turbin. Sedangkan untuk memperhitungkan kemampuan turbin dalam mengekstraksikan angin yaitu

menggunakan efisiensi kerja turbin yang dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$C_p = \frac{P_m}{P_a} \quad (2.5)$$

Dimana :

$P_m$  = daya mekanik (watt)

$C_p$  = koefisien daya pada turbin angin,

Efisiensi kerja turbin tidak dapat melebihi 0,593, hal tersebut dikenal sebagai *limit betz*. Dengan menggabungkan persamaan (2.4), (2.5) dan efisiensi kerja turbin maksimal, maka dapat dituliskan seperti persamaan berikut :

$$P_{maks} = 0,2965 CP = \rho Av^3, \quad (2.6)$$

Dimana :

$P_{maks}$  = daya maksimum atau daya turbin angin dalam kondisi ideal.

### 2.2.3.1 Inverter

*Inverter* adalah suatu rangkaian atau perangkat elektronika yang dapat mengubah arus listrik searah (DC) ke arus listrik bolak-balik (AC) pada tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan sesuai dengan perancangan rangkaiannya. Sumber-sumber arus listrik searah atau arus DC yang merupakan Input dari *Power Inverter* tersebut dapat berupa Baterai, Aki maupun Sel Surya ( *Cell*). Inverter ini akan sangat bermanfaat apabila digunakan di daerah-daerah yang memiliki keterbatasan pasokan

arus listrik AC. Karena dengan adanya Power Inverter, kita dapat menggunakan Aki ataupun Sel Surya untuk menggerakkan peralatan-peralatan rumah tangga seperti Televisi, Kipas Angin, Komputer atau bahkan Kulkas dan Mesin Cuci yang pada umumnya memerlukan sumber listrik AC yang bertegangan 220V ataupun 110V.[12]



Gambar 2.4 Inverter [12]

Bentuk-bentuk Gelombang yang dapat dihasilkan oleh Power Inverter diantaranya adalah gelombang persegi (*square wave*), gelombang sinus (*sine wave*), gelombang sinus yang dimodifikasi (*modified sine wave*) dan gelombang modulasi pulsa lebar (*pulse width modulated wave*) tergantung pada desain rangkaian inverter yang bersangkutan. Namun pada saat ini, bentuk-bentuk gelombang yang paling banyak digunakan adalah bentuk gelombang sinus (*sine wave*) dan gelombang sinus yang dimodifikasi (*modified sine wave*). Sedangkan Frekuensi arus listrik yang

dihasilkan pada umumnya adalah sekitar 50Hz atau 60Hz dengan Tegangan Output sekitar 120V atau 240V.

Menurut jenis gelombang keluarannya *Inverter* dibedakan menjadi dua yaitu :

1. *Inverter* Sumber Arus (*Current Source Inverter*)

Ciri-ciri *inverter* sumber arus (ISA) :

- a. ISA didesain hanya untuk mengontrol frekuensi, oleh karena itu diperlukan suatu rangkaian *chopper* untuk mengatur tegangan keluar.
- b. *Output* yang dihasilkan adalah *black modulation* sehingga dibutuhkan solusi tambahan untuk menekan harmonik dan pulsating torque, yaitu dengan memperbesar induktansi motor.
- c. Kontrol traksi yang diaplikasikan relatif sederhana sehingga dapat direalisasikan dengan menggunakan teknik TTL (*Transistor-Transistor Logic*) atau *analog*.

2. *Inverter* Sumber Tegangan (*Voltage Source Inverter*)

Ciri-ciri *Inverter* sumber tegangan (IST) :

- a. IST mengontrol baik frekuensi maupun tegangan output dengan mempergunakan teknik PWM (*Pulse Width Modulation*) oleh sebab itu diperlukan sistem kontrol yang kompleks (*Microprocessor*).
- b. PWM menghasilkan *output* yang mensekati sinus sehingga harmonik dan pulsating torque dapat ditekan, yaitu dengan melakukan pengaturan *software* untuk menghasilkan patron-patron pulsa yang diinginkan.

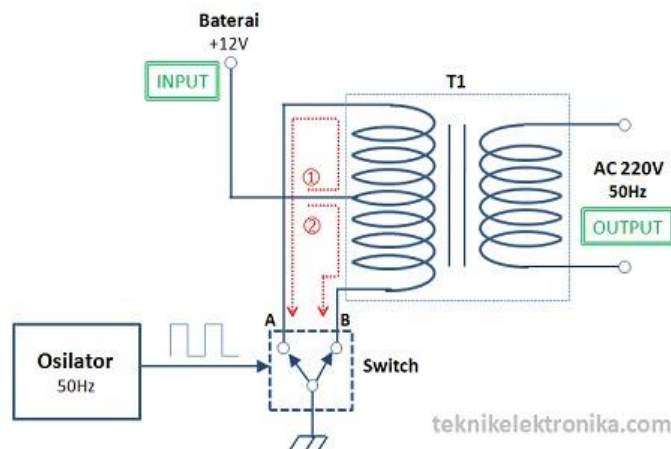
- c. Kontrol traksi yang diaplikasikan sangat kompleks sehingga diperlukan teknik kontrol digital dengan mikrokomputer atau mikroprosesor dan software programming yang memerlukan kualifikasi personil yang secara khusus mendalami bidang tersebut.

*Inverter* sumber tegangan (*Voltage Source Inverter*) dibedakan menjadi dua yaitu :

1. *Inverter* sumber tegangan dengan frekuensi dan tegangan keluaran konstan.
2. *Inverter* sumber tegangan dengan frekuensi dan tegangan keluaran berubah.

Keluaran *inverter* inilah yang menjadi masukan bagi motor AC yang banyak digunakan diperusahaan ini, terutama motor induksi (AC) untuk mesin-mesin agar diperoleh hasil produksi yang sesuai dengan keinginan perusahaan.

Suatu Power Inverter yang dapat mengubah arus listrik DC ke arus listrik AC ini hanya terdiri dari rangkaian Osilator, rangkaian Saklar (Switch) dan sebuah Transformator (trafo) CT seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini



Gambar 2.5 rangkaian inverter [13]

Sumber daya yang berupa arus listrik DC dengan tegangan rendah (contoh 12V) diberikan ke Center Tap (CT) Sekunder Transformator sedangkan dua ujung Transformator lainnya (titik A dan titik B) dihubungkan melalui saklar (switch) dua arah ke ground rangkaian. Jika saklar terhubung pada titik A akan menyebabkan arus listrik jalur 1 mengalir dari terminal positif baterai ke Center Tap Primer Transformator yang kemudian mengalir ke titik A Transformator hingga ke ground melalui saklar. Pada saat saklar dipindahkan dari titik A ke titik B, arus listrik yang mengalir pada jalur 1 akan berhenti dan arus listrik jalur 2 akan mulai mengalir dari terminal positif baterai ke Center Tap Primer Transformator hingga ke ground melalui Saklar titik B. Titik A, B dan Jalur 1, 2.

Peralihan ON dan OFF atau A dan B pada Saklar (Switch) ini dikendalikan oleh sebuah rangkaian Osilator yang berfungsi sebagai pembangkit frekuensi 50Hz yaitu mengalihkan arus listrik dari titik A ke titik B dan titik B ke titik A dengan kecepatan 50 kali per detik. Dengan demikian, arus listrik DC yang mengalir di jalur 1 dan jalur 2 juga bergantian sebanyak 50 kali per detik juga sehingga ekuivalen dengan arus listrik AC yang berfrekuensi 50Hz. Sedangkan komponen utama yang digunakan sebagai Switch di rangkaian Switch Inverter tersebut pada umumnya adalah MOSFET ataupun Transistor.

Sekunder Transformator akan menghasilkan Output yang berupa tegangan yang lebih tinggi (contohnya 120V atau 240V) tergantung pada jumlah lilitan pada



kumparan sekunder Transformator atau rasio lilitan antara Primer dan Sekunder Transformator yang digunakan pada Inverter tersebut.

### **2.2.3.2 Charge Controller**

*charge controller* adalah salah satu komponen didalam system pembangkit listrik DC, yang berfungsi sebagai pengatur arus listrik baik terhadap arus yang masuk dari panel surya maupun arus beban keluar yang digunakan. *charge controller* ini bekerja untuk menjaga baterai dari pengisian yang berlebihan dan mengatur tegangan serta arus dari panel surya ke baterai.

Sebagian besar panel surya 12 volt menghasilkan tegangan keluaran sekitar 16 sampai 20 volt DC, jadi jika tidak ada pengaturan, baterai akan cepat rusak dari pengisian tegangan yang berlebihan. Pada umumnya baterai 12 volt membutuhkan tegangan pengisian sekitar 13-14,8 volt (tergantung tipe baterai) untuk dapat terisi penuh.

Ada dua jenis teknologi yang umum digunakan oleh charge controller:

1. PWM (Pulse Wide Modulation), seperti namanya menggunakan 'lebar' pulse dari on dan off elektrik, sehingga menciptakan seakan-akan sine wave electrical form.
2. MPPT (*Maximun Power Point Tracker*), yang lebih efisien konversi DC to DC (*Direct Current*). MPPT dapat mengambil *maximum* daya dari PV. MPPT charge controller dapat menyimpan kelebihan daya yang tidak digunakan oleh

beban ke dalam baterai, dan apabila daya yang dibutuhkan beban lebih besar dari daya yang dihasilkan oleh PV, maka daya dapat diambil dari baterai.

#### Fungsi dan fitur *charge controller*

1. Saat tegangan pengisian di baterai telah mencapai keadaan penuh, maka *controller* akan menghentikan arus listrik yang masuk ke dalam baterai untuk mencegah pengisian yang berlebihan.
2. Saat tegangan di baterai dalam keadaan hampir kosong, maka *controller* berfungsi menghentikan pengambilan arus listrik dari baterai oleh beban / peralatan listrik. Dalam kondisi tegangan tertentu ( umumnya sekitar 10% sisa tegangan di baterai ) , maka pemutusan arus beban dilakukan oleh *controller*. Hal ini menjaga baterai dan mencegah kerusakan pada sel – sel baterai. Pada kebanyakan model *controller*, indikator lampu akan menyala dengan warna tertentu ( umumnya berwarna merah atau kuning ) yang menunjukkan bahwa baterai dalam proses pengisian.
3. Mengatur arus yang dibebaskan atau diambil dari baterai agar baterai tidak *full discharge* dan *overloading*.

#### **2.2.2.3 Baterai**

Baterai adalah perangkat yang tidak dapat dipisahkan dalam system satelit. System ini akan menyediakan daya listrik untuk misi yang pendek atau sebagai *back-up* untuk misi yang panjang. Satelit menggunakan panel sebagai sumber energi utama

dan menyimpan energi ke dalam baterai. Baterai tersebut akan digunakan untuk kebutuhan daya listrik yang sangat tinggi atau pada saat terjadi *eclipse*. [14]

Dalam penelitian lain disebutkan Battery merupakan alat yang digunakan untuk menyimpan sumber energi listrik melalui proses elektro kimia yaitu dari proses kimia dirubah menjadi tenaga listrik (saat proses pengosongan) dan sebaliknya dari tenaga listrik dirubah menjadi proses kimia (saat proses pengisian). Arus yang berasal dari battery yaitu arus searah atau arus DC. Sedangkan tegangan battery yang digunakan adalah sebesar 12 volt. [15]

Dalam mempertimbangkan posisi peletakannya maka aki kering tidak mempunyai kendala, lain halnya dengan aki basah. Aki konvensional kandungan timbalnya (Pb) juga masih tinggi sekitar 2,5% untuk masing-masing sel positif dan negatif. Sedangkan jenis hybrid kandungan timbalnya sudah dikurangi menjadi masing-masing 1,7%, hanya saja sel negatifnya sudah ditambahkan unsur calcium.

Terdapat 2 jenis baterai berdasarkan pada proses yang terjadi, yaitu:

### 3. *Primary battery*

Baterai yang hanya dapat digunakan sekali saja dan dibuang. Material elektrodanya tidak dapat berkebalikan arah ketika dilepaskan.

### 4. *Secondary battery*

Baterai yang dapat digunakan dan diisi ulang beberapa kali, proses kimia yang terjadi di dalam baterai ada reversibel, dan baha aktif dapat kembali ke kondisi semula dengan pengisian sel.

Secara garis besar, baterai dapat dibedakan berdasarkan aplikasi dan konstruksinya. Berdasarkan aplikasi maka baterai dibedakan untuk automotif, marine, dan deep cycle. Deep cycle meliputi baterai yang biasa digunakan untuk PV (*photo voltaic*) dan *back up power*, sedangkan secara konstruksi maka baterai dibedakan menjadi type basah, gel dan AGM (*Absorbed Glass Mat*). Baterai jenis AGM biasanya juga dikenal dengan VRLA (*valve Regulated Lead Acid*).

Kapasitas baterai dapat dinyatakan dengan persamaan dibawah ini

$$N (\text{Ah}) = I (\text{ampere}) \times t (\text{hours})$$

Dimana :

N = kapasitas baterai aki

I = kuat arus (ampere)

t = waktu (jam/second)

komponen-komponen baterai terdiri atas:

- a. Kotak baterai
- b. Elektrolit baterai
- c. Sumbat ventilasi
- d. Plat positif dan plat negative
- e. Separator
- f. Lapisan serat gelas (fiber glass)
- g. Sel batera



Gambar 2.7 Baterai [16]

#### 2.2.3.4 Generator DC

Generator DC merupakan sebuah perangkat mesin listrik dinamis yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Generator DC menghasilkan arus DC / arus searah. Generator DC dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan dari rangkaian belitan magnet atau penguat eksitasinya terhadap jangkar (anker). [9]

Energi kinetik angin yang berhembus dalam satuan waktu adalah:

$$P_w = \frac{1}{2} A v^2 \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

$P_w$  : Daya angin (W)

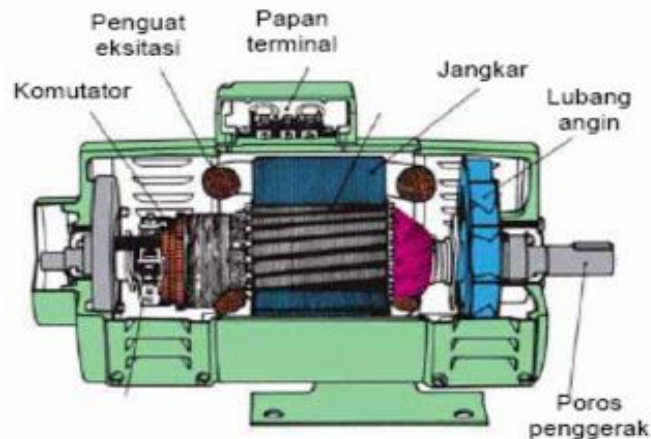
$v$  : kecepatan angin (m/s)

$A$  : luas penampang ( $m^2$ )

: kerapatan udara ( $1.1726 \text{ kg/m}^3$ )

Generator adalah suatu alat yang dapat mengubah Energi Mekanik menjadi Energi Listrik. Energi Mekanik tersebut dapat berupa turbin angin, turbin air dan turbin uap. Dari turbin tersebut, dapat memutar poros generator dimana yang bisa menghasilkan energi listrik dari kumparan yang ada di dalam generator itu sendiri. Pada awalnya generator masih menggunakan prinsip listrik elektrostatik, yaitu tegangan yang dihasilkan tinggi dan arus rendah ketika di putar. Pengoperasian generator tersebut masih menggunakan sabuk, lempengan dan disk. Sebagai contoh generator Van de Graaff dan Mesin Wimshurt Tahun 1827, Anyos Jedlik seorang pemuda Hungaris melakukan percobaan dengan menggunakan alat rotasi elektromagnetik. [17] Pada saat itu Anyos menamai mesin hasil ciptaannya dengan nama “electromagnetic self-rotors”, atau lebih dikenal dengan nama “Dinamo Jedlik”. Sebenarnya dia membuat konsep dynamo 6 tahun sebelum Siemens dan Wheatstone, tetapi dia tidak mematenkannya karena dia berpikir sudah ada orang lain yang berhasil menemukan ciptaannya. Tahun 1831-1832, Michael Faraday melakukan percobaan dan menemukan adanya efek khusus yang dihasilkan dari ujung-ujung konduktor listrik yang bergerak lurus terhadap medan magnet. Dari efek ini, dia berhasil menjadi orang pertama yang membuat generator elektromagnetik. Generator elektromagnetik dibuat dengan menggunakan cakram tembaga yang berputar di antara kutub magnet tapal kuda dan menghasilkan arus searah yang kecil. Rancangan cakram Michael Faraday ini di sebut “Cakram Faraday”, dan cakram tersebut kurang efisien. Hal ini disebabkan

karena masih ada arus listrik berlawanan di bagian cakram yang masih belum terpengaruh oleh medan magnet dimana arus ini dapat membatasi tenaga yang dialirkan ke kawat penghantar. Desain generator yang selanjutnya lebih efisien, karena masalah arus listrik yang berlawanan tadi bisa diatasi dengan menempatkan magnet-magnet kecil di sekeliling mengitari cakram tembaga. Tetapi generator ini masih memiliki kelemahan dimana tegangan yang dihasilkan masih kecil karena menggunakan jalur tunggal fluks magnet. Generator tersebut dinamakan Generator Homopolar. Generator-generator tersebut masih menghasilkan tegangan dan arus listrik skala kecil, maka diadakan penelitian oleh Hippolyte Pixii yang berwarga negara Prancis pada tahun 1832. [18]



Gambar 2.7 Generator [14]

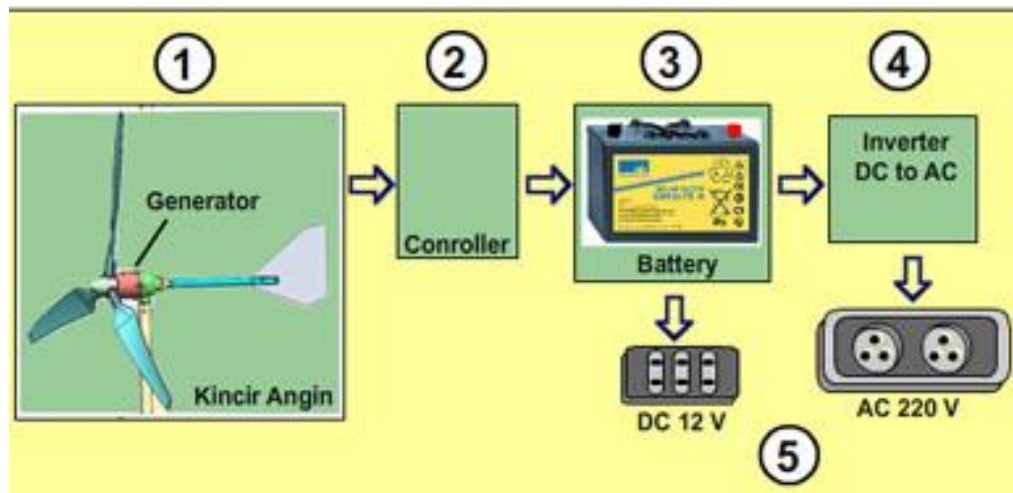
Dinamo atau nama lain adalah generator, yang pertama kali dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan industri skala besar. Generator ini menggunakan magnet permanen yang diputar oleh crank. Magnet yang dibuat sedemikian rupa ini dapat

bergerak dan apabila bergerak kutub utara dan selatan dapat melewati kumparan tembaga. Perkembangan zaman yang semakin maju pada saat ini, telah ditemukan generator baru dengan type “3 phase permanent magnet with Cogging-less Tecnology”, salah satu anak bangsa yang mendedikasikan dirinya untuk perkembangan kincir angin di Indonesia sendiri. Generator tersebut telah disempurnakan dengan meminimalisasi hentakan arus berlawanan yg terjadi pada rotor generator saat berputar, sehingga dengan kecepatan angin yang rendahpun sudah dapat memutar generator ini. [19]

#### **2.2.3.5 Konfigurasi PLTB**

Putaran blade membuat generator berputar dan menghasilkan tegangan AC 3 fasa yang mewakili vektor arah angin, yaitu u, v, dan w. Kemudian dialirkan menuju controller (teknologi pengamanan dan konversi energi) dan hasil keluaran dari controller ini berupa tegangan DC (telah dikonversi dari AC menjadi DC karena media penyimpanan energi dalam bentuk DC). Setelah itu, dialirkan kembali menuju data logger untuk dilakukan perekaman data dan selanjutnya disimpan ke dalam baterai/aki. Sebelum digunakan ke beban (peralatan listrik AC), energy yang telah disimpan ini harus dikonversi terlebih dahulu melalui inverter (tegangan DC menjadi AC) [18]





Gambar 2.11 Skema PLTB

#### 2.2.4 Beban Listrik

Beban sistem tenaga listrik merupakan pemakaian tenaga listrik dari para pelanggan listrik. Oleh karenanya, besar kecilnya beban beserta perubahannya tergantung pada kebutuhan para pelanggan akan tenaga listrik. Tidak ada perhitungan eksak mengenai besarnya beban sistem pada suatu saat, yang bisa dilakukan hanyalah membuat perkiraan beban. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik harus selalu diusahakan agar daya yang dibangkitkan sama dengan beban sistem. Maka masalah perkiraan beban merupakan masalah yang sangat menentukan bagi kelembagaan listrik baik segi-segi manajerial maupun bagi segi operasional, oleh karena itu perlu mendapat perhatian khusus. Untuk dapat membuat perkiraan beban yang sebaik mungkin perlu beban sistem tenaga listrik yang sudah terjadi di masa lalu dianalisa [20]

Menurut Djiteng Marsudi (2006) pembagian kelompok perkiraan beban yaitu, Perkiraan beban jangka panjang Perkiraan beban jangka panjang adalah untuk jangka

waktu di atas satu tahun. Dalam perkiraan beban jangka panjang masalah-masalah makro ekonomi yang merupakan masalah ekstern kelembagaan listrik merupakan faktor utama yang menentukan arah perkiraan beban. Perkiraan beban jangka menengah Perkiraan beban jangka menengah adalah untuk jangka waktu dari satu bulan sampai dengan satu tahun. Poros untuk perkiraan beban jangka menengah adalah perkiraan beban jangka panjang. Perkiraan beban jangka pendek Perkiraan beban jangka pendek adalah untuk jangka waktu beberapa jam sampai satu minggu (168 jam). Dalam perkiraan beban jangka pendek batas atas untuk beban maksimum dan batas bawah untuk beban minimum yang ditentukan dalam perkiraan beban jangka menengah.

Beban rata-rata ( $Br$ ) didefinisikan sebagai perbandingan antara energi yang terpakai dengan waktu pada periode. Atau dituliskan menurut persamaan 1 periode tahunan : [32]

$$Br = \frac{\text{KWh yang terpakai selama 1 tahun}}{365 \times 24} \quad (2.13)$$

Faktor beban didefinisikan sebagai perbandingan antara beban rata-rata dengan beban puncak yang diukur untuk suatu periode waktu tertentu. Beban puncak ( $Lf$ ) yang dimaksud adalah beban puncak sesaat atau beban puncak rata-rata dalam interval tertentu, pada umumnya dipakai beban puncak pada waktu 15 menit atau 30 menit. Untuk prakiraan besarnya faktor beban pada masa yang akan datang dapat didekati dengan data statistik yang ada. Dari definisi faktor beban dapat dituliskan : [20]

$$Lf = \frac{Bp \text{ (Beban Rata-Rata)}}{Bc \text{ (Beban Puncak)}} \quad (2.14)$$

Persamaan tersebut mengandung arti bahwa beban rata-rata akan selalu bernilai lebih kecil dari kebutuhan maksimum atau beban puncak, sehingga faktor beban akan selalu kecil dari satu [32] Daya listrik adalah tingkat konsumsi energi dalam sebuah sirkuit atau rangkaian listrik. Daya listrik menyatakan banyaknya energi listrik yang terpakai setiap detiknya. Satuan daya listrik adalah Watt. Di mana 1 Watt = 1 Joule/detik. [20]

$$P = \frac{E}{t} \quad (2.15)$$

Dimana :

P = Daya Aktif (Watt)

t = Waktu (Jam)

E = Energi (Joule)

Pada dasarnya daya listrik terbagi menjadi 3 yaitu : [33]

a. Daya nyata atau daya aktif (Watt)

Daya nyata merupakan daya Sebenarnya yang dibutuhkan beban dan biasanya daya aktif nilainya lebih rendah dibandingkan dengan daya semu. Daya Aktif dihasilkan dari hasil perkalian Daya Semu dengan Faktor Daya (Cosphi). Daya aktif akan mengalami penurunan nilai yang diakibatkan adanya beban-beban listrik yang menghasilkan daya reaktif.

$$P = V \times I \times \text{Cos } \phi \quad (2.16)$$

Dimana :

P = Daya Aktif (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Cos  $\phi$  = Faktor Daya

b. Daya Semu (VA)

Daya Semu merupakan daya yang dihasilkan dari perhitungan-perhitungan listrik sebelum dibebani dengan bebanbeban listrik. Satuan daya nyata adalah VA (Volt.ampere). beban yang bersifat daya semu adalah beban yang bersifat resistansi (R). Peralatan listrik atau beban pada rangkaian listrik yang bersifat resistansi tidak dapat dihemat karena tegangan dan arus listrik memiliki nilai factor daya adalah 1

$$S = V \times I \quad (2.17)$$

Dimana :

S = Daya Semu (VA)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

c. Daya Reaktif (VAR)

Daya Reaktif merupakan daya yang mengakibatkan terjadinya kerugiankerugian daya, sehingga daya dapat mengakibatkan terjadinya penurunan nilai factor daya (Cosphi). Satuan daya reaktif adalah VAR (Volt. Amper Reaktif). Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan memasang kapasitor pada rangkaian yang memiliki beban bersifat induktif.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.18)$$

Dimana :

Q = Daya reaktif (VAR)

S = Daya semu (VA)

P = Daya Aktif (Watt)

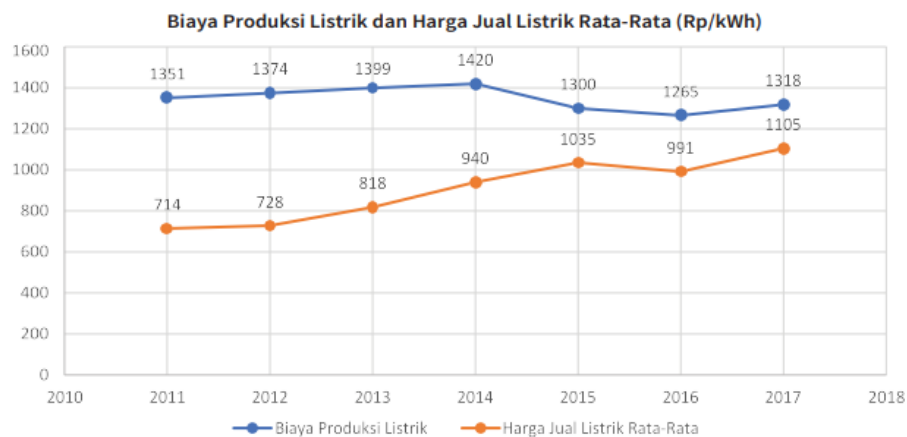
### 2.2.5 Tarif Listrik

Tarif Tenaga Listrik (TTL) adalah tarif yang dikenakan oleh pemegang Ijin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (IUPTL) kepada konsumen/pelanggan, yang mana besaran tarifnya ditetapkan oleh Pemerintah/Pemerintah Daerah. Berdasarkan UU Kelistrikan No. 30/2009, TTL ditentukan oleh pemerintah (c.q. Kementerian ESDM)/pemerintah daerah dengan persetujuan DPR/DPRD. Sebagian besar wilayah usaha PT PLN menggunakan TTL yang seragam (uniform) untuk setiap kelompok pelanggan, kecuali untuk Pulau Batam dan Tarakan dimana TTL ditentukan oleh pemerintah daerah dan disetujui oleh DPRD. Adanya keterlibatan DPR dalam

penetapan TTL dan subsidi menjadikan proses ini sarat dengan kepentingan politik, selain daripada teknis ekonomi. Sementara itu, untuk melaksanakan percepatan penyediaan tenaga listrik di desa tertinggal, terpencil, dan terluar (3T) pemerintah mengadakan program Listrik Desa (LisDes) yang mengutamakan penggunaan sumber energi setempat. Untuk daerah isolated yang sulit dijangkau oleh jaringan PLN, pemerintah melalui direktorat jenderal EBTKE menyediakan lampu tenaga surya hemat energi (LTSHE) sebagai bagian dari program pra-elektifikasi. [21]

Ada dua jenis mekanisme tarif yang digunakan di program LisDes, dengan dan tanpa subsidi. Tarif bersubsidi akan dikenakan pada wilayah usaha yang ditetapkan oleh Menteri ESDM atas usulan gubernur (Permen ESDM No. 38/2016). Diluar itu, akan dikenakan tarif non-subsidi yang ditetapkan oleh gubernur. Dalam hal gubernur tidak dapat menetapkan tarif non-subsidi, pemerintah akan menetapkan tarif berdasarkan TTL PT. PLN. Besaran subsidi yang diberikan kepada badan usaha bergantung pada TTL rumah tangga daya 450 VA, Biaya Pokok Penyediaan (BPP), ditambah margin. Adapun mekanisme penyesuaian TTL (tari adjustment) PT. PLN bergantung pada BPP, nilai tukar mata uang Dollar Amerika terhadap Rupiah (kurs), Indonesian Crude Price (ICP), dan inflasi. Terdapat dua tipe pembayaran listrik di Indonesia, tarif pascabayar yang dibayar setelah pemakaian listrik oleh konsumen pada bulan berikutnya dan tarif prabayar, dimana konsumen membayar kuota listriknya terlebih dulu. Listrik dianggap sebagai barang untuk kepentingan strategis sehingga tidak dikenakan pajak pertambahan nilai (PPN), kecuali untuk rumah dengan kapasitas daya lebih dari 6600 VA. [22]

Seperti terlihat pada Gambar 2.12, biaya produksi listrik selalu lebih tinggi daripada harga jual listrik rata-rata. Selisih ini akan dibayarkan oleh pemerintah ke PLN melalui mekanisme subsidi. Jumlah subsidi listrik yang dibayarkan oleh pemerintah per tahun dapat dilihat pada Gambar 2. Walaupun sejak 2015 jumlah subsidi listrik menurun drastis karena dicabutnya subsidi listrik untuk semua golongan kecuali golongan rumah tangga 450 VA dan 900 VA, tren tiga tahun terakhir menunjukkan adanya pembengkakan subsidi listrik (subsidi lebih besar daripada yang dianggarkan). Penurunan subsidi listrik dari Rp 60.4 triliun di 2016 menjadi Rp 45.7 triliun di 2017 terjadi bersamaan dengan dicabutnya subsidi listrik bagi golongan 900 VA yang dianggap mampu sejak Januari 2017, mengikuti terbitnya Permen ESDM No. 29/2016.[22]



Gambar 1 Biaya produksi listrik dan harga jual listrik rata-rata. Biaya produksi listrik mencakup biaya pembangkitan dan biaya transmisi dan distribusi. Sumber: Statistik PLN.

Gambar 2.12 Biaya Produksi dan Harga Jual Listrik (Rp/kWh) [22]

Meskipun Permen ESDM No. 18/2017 mengatur penyesuaian tarif (tari adjustment) untuk dilakukan setiap 3 bulan (setiap bulan dalam pada Permen ESDM No. 28/2016 sebelumnya), sejak Januari 2017 pemerintah belum menaikkan TTL ke pelanggan PLN, bahkan berjanji untuk tidak menaikkan TTL hingga 2019. Menurut pemerintah, hal ini dilakukan untuk menjaga daya beli masyarakat dan mendukung stabilitas ekonomi nasional. Sementara itu, sejumlah pengamat energi berpendapat keputusan untuk tidak menaikkan TTL ini berkaitan erat dengan tahun politik dan sudah sering dilakukan oleh pemerintahan sebelumnya untuk menjaga dukungan politik dari masyarakat dalam pemilihan umum (pemilu). Golongan tarif listrik di Indonesia dibagi menjadi 37 golongan, 13 diantaranya terikat dengan mekanisme penyesuaian tarif (tari adjustment). Golongan tarif listrik dibedakan berdasarkan penggunaannya (sosial, rumah tangga, bisnis, industri, kantor pemerintah dan penerangan umum, traksi, curah, dan layanan khusus) dan kapasitas daya listriknya (450 VA, 900 VA, 1300 VA, 2200 VA, 3500-5500 VA, >6600 VA). Penetapan TTL dan penyesuaian tarif diatur dalam peraturan Menteri (Permen) ESDM No. 28/2016 (diubah oleh Permen ESDM No. 18/2017 dan Permen ESDM No. 41/2017) tentang Tarif Tenaga Listrik yang disediakan oleh PT. PLN (Persero). [22]

Banyaknya golongan tarif ini menjadi sorotan karena dinilai terlalu rumit. Praktik di negara-negara lain umumnya tidak menggunakan penggolongan tarif berdasarkan kapasitas daya, namun hanya berdasarkan sektor penggunaannya. Pada umumnya di liberalized market perusahaan listrik mengenakan tarif yang tetap (fixed) untuk semua pelanggannya (e.g. Jerman). Adapun praktik lainnya, perusahaan listrik dapat



mengenakan tarif progresif dimana semakin besar penggunaan listrik maka semakin besar pula tarif listrik per unitnya (e.g. Italia). Selain itu, ada juga negara yang menerapkan perubahan tarif listrik berdasarkan waktu penggunaan (Time of Use) dimana tarif ketika beban puncak akan lebih tinggi daripada tarif pada waktu lainnya (e.g. Australia dan Taiwan). [23]

Beberapa negara menerapkan sistem subsidi untuk masyarakat miskin (yang tingkat konsumsi listriknya rendah). Sebagai contoh, sejak tahun 2008 hingga 2018, perusahaan listrik Malaysia memberikan rabat (rebate) sebesar RM20 (sekitar Rp 68,000) untuk semua pelanggan listrik. Jika konsumsi listriknya melebihi RM20, maka pelanggan harus membayar tarif penuh (bukan hanya kelebihannya). Sejak 1 Januari 2019, pemerintah Malaysia mengubah skema rabatnya menjadi RM40, namun rabat ini hanya diberikan kepada masyarakat miskin yang terdampak. Jika konsumsi listriknya melebihi RM40, maka pelanggan hanya perlu membayar kelebihannya. Sementara itu, beberapa negara lain menetapkan tarif listrik yang lebih tinggi dibanding biaya produksinya. Di Jerman, selain biaya pembangkitan, komponen tarif listrik terdiri dari komponen tarif jaringan, pungutan (levies/surcharge) untuk pembiayaan Energi Terbarukan (ET), dan pajak lainnya. Di tahun 2018, lebih dari setengah (54%) tarif listrik untuk rumah tangga dan usaha kecil merupakan komponen pungutan dan pajak – 23% nya adalah pungutan (surcharge) untuk ET, 25% untuk biaya jaringan, dan hanya 21% untuk biaya pembangkitan (BDEW, 2018). Tingginya surcharge untuk ET sejalan dengan komitmen pemerintah Jerman dalam pengembangan ET untuk menggantikan energi nuklir dan juga batubara. Meskipun tarif listrik di Jerman

merupakan tarif listrik termahal kedua di EU setelah Denmark, tagihan listrik per bulan untuk rumah tangga di negara tersebut tidak lebih mahal dari negara-negara OECD lainnya. Hal ini dimungkinkan oleh program Efisiensi Energi yang berjalan dengan efektif di Jerman. [22]

Belajar dari pengalaman di negara lain, kebijakan tarif listrik di Indonesia hendaknya memperhitungkan rencana jangka panjang untuk memastikan ketahanan energi. Salah satu komponen yang masih belum diakomodasi dalam skema tarif saat ini adalah komponen tarif untuk pengembangan ET. Penggunaan surcharge di Indonesia mungkin bisa diterapkan untuk golongan masyarakat mampu. Hal ini menjadi penting, mengingat perkembangan ET di Indonesia cukup lambat karena tidak adanya insentif untuk PLN untuk menggunakan ET. Sementara itu, untuk memastikan akses energi ke semua golongan masyarakat, pemerintah bisa mempertimbangkan untuk membebaskan golongan masyarakat tidak mampu dari tagihan listrik. [34]

### **2.2.6 Analisis Potensi PLTB**

Dalam perencanaan pembangkit listrik ada perencanaan teknis dan ada perencanaan ekonomis. Dimana ke dua perencanaan ini saling berhubungan untuk merealisasikan rencana yang telah disusun

#### **1. Perencanaan Teknis**

Perencanaan teknis pembangkit listrik ada beberapa hal yang harus diperhatikan yaitu sebagai berikut : [24]

1. Perkiraan beban

Perkiraan beban merupakan hal yang perlu dilakukan dalam perencanaan pembangkit listrik dalam sistem interkoneksi maupun yang berdiri sendiri/ terisolir (isolated), yang meliputi analisis kebutuhan beban selama umur proyek (lifetime), termasuk memperkirakan beban puncak, beban harian, dan beban tahunan.

2. Perencanaan Fisik Pembangkit

Perencanaan teknis pembangkit yang meliputi pemilihan teknologi pembangkit yang akan digunakan, seperti pemilihan jenis Turbin yang akan digunakan atau pemilihan tipe bilah (blade) yang akan mengkonversi energi angin secara langsung. Sebagai contoh, untuk pemilihan turbin yang melayani beban dasar yang membutuhkan suplai listrik kontinyu setiap hari, maka akan digunakan turbin yang tidak memiliki cogging sehingga tidak menghambat putaran turbin., sedangkan untuk Batterai yang digunakan hanya sebagai back-up dengan jam operasi hanya beberapa jam per hari.

3. Perencanaan Pengembangan

Pada tahap ini dilakukan perencanaan pengembangan awal dengan menentukan kapasitas produksi pembangkit yang akan dibangun, investasi dan biaya produksi energi listrik.

4. Perencanaan Pengoperasian

Pada tahap ini, dilakukan tahap perencanaan sistem pengoperasian. Untuk sistem pembangkit skala kecil yang berdiri sendiri, maka akan merencanakan manajemen sistem otomatis, manual maupun semi otomatis.

## 5. Perencanaan Lingkungan

Memperhatikan lingkungan sekitar juga termasuk hal yang harus diperhatikan dalam perencanaan pembangkit listrik, sehingga perencanaan lingkungan juga berhubungan dengan lokasi yang akan dipilih agar tidak mengganggu lingkungan sekitar. Dalam tahap ini juga akan dilakukan perencanaan dalam mengatasi limbah maupun polusi yang ditimbulkan pembangkit .

## 6. Perencanaan Ekonomis

Nilai Ekonomis dari suatu investasi adalah deret seragam dari modal yang tertanam dalam suatu investasi selama umur dari investasi tersebut. Nilai ekonomis bisa digunakan untuk melihat apakah suatu investasi akan memberikan pendapatan yang cukup untuk menutupi modal yang dikeluarkan termasuk bunga yang mestinya dihasilkan selama umur dari investasi tersebut. Nilai sisa dalam suatu perhitungan ekonomis dianggap sebagai pendapatan atau keuntungan.[5]

### a. *Payback Periode*

Pada dasarnya periode pengembalian (Payback Period) adalah jumlah periode (tahun) yang diperlukan untuk mengembalikan (menutup) ongkos investasi awal dengan tingkat pengembalian tertentu. Perhitungannya dilakukan berdasarkan alirankas baik tahunan maupun yang merupakan nilai sisa. Untuk mendapatkan periode pengembalian pada suatu tingkat pengembalian (rate of return) tertentu digunakan model formula berikut: [5]

$$0 = -P_w + \sum_{t=0}^N A_w t \left( \frac{P_w}{F_w}, i \%, t \right) \quad (2.7)$$

Dimana :

A<sub>w</sub>t = Aliran Kas Yang Terjadi pada periode t

N = Periode pengembalian

t = Waktu Pengembalian

Apabila suatu alternatif memiliki masa pakai ekonomis lebih besar dari periode pengembalian N maka alternatif tersebut layak diterima. Sebaliknya, bila N lebih besar dari estimasi masa pakai suatu alat atau umur suatu investasi maka investasi atau alat tersebut tidak layak diterima karena tidak akan cukup waktu untuk mengembalikan modal yang dipakai sebagai biaya awal dari investasi tersebut.

#### b. *Break Even 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 PVSyst tidak menghitung nilai BEP, maka digunakan perhitungan secara manual. Menurut penelitian yang serupa, BEP adalah suatu keadaan impas yaitu apabila telah dihitung laba dan rugi suatu periode tertentu, maka perusahaan tersebut tidak mendapat keuntungan dan sebaliknya tidak menderita kerugian. Adapun titik BEP dapat dinyatakan dalam persamaan : [6]

$$BEP = \frac{FC}{P-VC} \quad (2.8)$$

Dimana :

BEP = *Break Even Point* (Rupiah)

FC = Biaya tetap (Rupiah)

VC = Biaya Variabel (Rupiah)

P = Harga Per Unit (Rupiah)

BEP juga dapat dicari dengan menggunakan aplikasi. Pada pembahasan ini menggunakan aplikasi analisis titik impas (*break even point* = BEP) untuk menentukan berapa tahun waktu yang dibutuhkan (berapa ongkos atau tariff yang harus dikeluarkan atau dijual) agar kinerja PLT-Angin pada titik impas. Permasalahan produksi energi listrik biasanya digunakan untuk menentukan ongkos, tarif dan tingkat produksi energi listrik yang bisa mengakibatkan perusahaan berada pada kondisi impas. Untuk mendapatkan titik impas ini maka harus dicari fungsi-fungsi biaya maupun pendapatannya. Pada saat kedua fungsi tersebut bertemu maka total biaya sama dengan total pendapatan.[5]

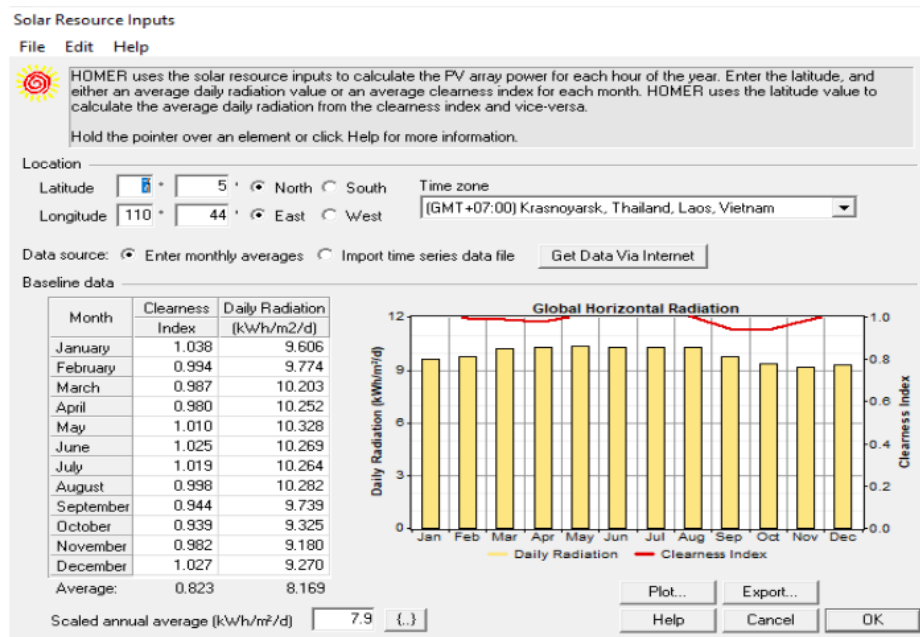
### 2.2.7 HOMER

HOMER adalah software model simulasi yang mensimulasikan sistem yang layak untuk semua kemungkinan kombinasi peralatan yang dipertimbangkan pertimbangannya. Homer bekerja berdasarkan 3 hal, yaitu simulasi, optimasi, dan analisa

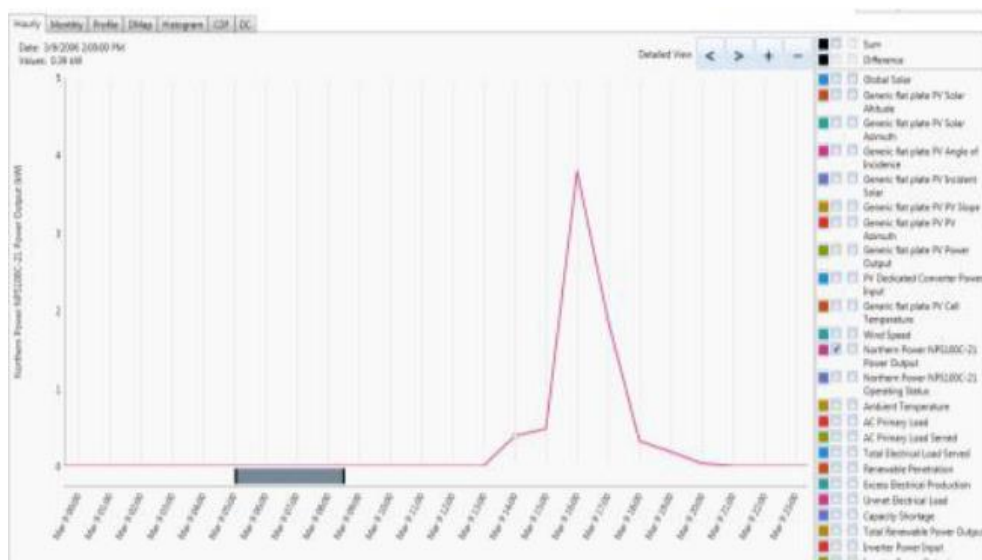
sensitifitas. Ketiga hal tersebut bekerja secara beruntun dan memiliki fungsi masing-masing, sehingga didapat hasil yang optimal. [13]

HOMER adalah perangkat lunak yang digunakan untuk membantu permodelan dari sebuah sistem tenaga listrik dengan menggunakan berbagai pilihan sumber daya terbarukan. HOMER mensimulasikan dan mengoptimalkan sistem pembangkit listrik baik mandiri maupun tersambung ke sistem yang dapat terdiri dari kombinasi turbin angin, mikrohidro, photovoltaic, biomass dll. Dalam banyak penelitian baik dari akademisi maupun praktisi penggiat energi terutama energi terbarukan software HOMER merupakan alat yang sangat membantu dalam proses pemodelan sistem energi terbarukan. Tingkat sensitifitas HOMER sangat tinggi sehingga sangat baik dalam mendesain ataupun menganalisa kelayakan sebuah pembangkit listrik dengan mempertimbangkan daya keluaran, biaya produksi energi, waktu pengembalian modal dalam investasi, limbah yang di hasilkan dari pembangkit diesel dan banyak lagi. 28 HOMER mensimulasikan operasi sistem dengan menyediakan perhitungan energi balace untuk setiap 8,760 jam dalam setahun. HOMER juga dapat menentukan konfigurasi terbaik sistem dan kemudian memperkirakan biaya instalasi dan operasi sistem selama pengoperasiannya (life cycle cost) seperti biaya awal, biaya penggantian komponen, biaya operasional dan perawatan, serta biaya bahan bakar dll (Kusnaifi, 2015). Ekonomi memegang peranan penting dalam proses simulasi HOMER, dimana dalam proses pengoperasian Net Present Cost (NPC) terendah. Sumber energi tak terbarukan dan sumber energi terbarukan memiliki karakteristik biaya yang berbeda. Sumber energi terbarukan memiliki biaya modal yang tinggi dan biaya operasi yang

rendah, sedangkan sumber energi tak terbarukan konvensional memiliki biaya modal yang rendah dan biaya operasi yang tinggi.



Gambar 2.8. Contoh Tampilan Homer [12]



Gambar 2.9 Contoh Grafik Pada Homer [21]



## 1. Prinsip Kerja Homer [22]

### a. Simulasi

Proses simulasi menentukan bagaimana konfigurasi dari sistem, kombinasi dari besarnya kapasitas komponen-komponen sistem, dan strategi operasi yang menentukan bagaimana komponen-komponen tersebut dapat bekerja bersama dalam periode waktu tertentu. HOMER dapat mensimulasikan berbagai macam konfigurasi sistem tenaga mikro, yang berisikan beberapa kombinasi dari photovoltaic, turbin angin, turbin air, generator, hidrogen, baterai, inverter, dan lain-lain. Sistem tersebut dapat terhubung ke jaringan transmisi ataupun terpisah, digunakan untuk melayani beban ac ataupun dc dan beban thermal.

### b. Optimasi

Proses optimisasi dilakukan setelah proses simulasi dilakukan simulasi memodelkan dan merancang konfigurasi sistem secara khusus, maka proses optimisasi dilakukan untuk menentukan kemungkinan teroptimal dalam konfigurasi sistem. Pada daftar hasil optimisasi, HOMER menggunakan nilai NPC yang terendah hingga tertinggi. Sistem dikatakan optimal, apabila salah satu konfigurasi sistem menunjukkan NPC terendah untuk jangka waktu yang telah ditentukan. Tujuan dari proses optimisasi adalah menentukan nilai optimal dari konfigurasi sistem dimana variabel nilai masukan dapat diubah-ubah sesuai keinginan pengguna.

c. Analisis Sensitifitas

Tahap selanjutnya adalah tahap analisis sensitifitas. Analisis sensitifitas ini akan menunjukkan bagaimana hasil konfigurasi sistem yang optimal apabila nilai parameter masukan (input) berbeda-beda. Pengguna dapat menunjukkan analisis sensitifitas dengan memasukan beberapa nilai variabel sensitifitas. Pada tahap ini, pengguna HOMER dapat memasukan rentang nilai untuk nilai variabel tunggal ataupun nilai variabel ganda yang dinamakan varibel sensitifitas. Contohnya termasuk harga tenaga listrik pada jaringan transmisi, harga bahan bakar, suku bunga per tahun, dan lain-lain

### **2.2.8 Kajian Pustaka Relefan**

Saat ini berbagai penelitian yang terkait dengan penggunaan sel surya dan pemanfaatan energi angin telah banyak dilakukan. Hal ini disebabkan karena penggunaannya merupakan alternatif guna mengurangi penggunaan energi listrik dari PLN serta guna memanfaatkan potensi alam yang sudah ada sehingga sangat membantu dalam mengurangi penggunaan energi fosil yang saat ini semakin menipis. Berdasarkan hal ini beberapa penelitian sebelumnya yang dijadikan acuan dalam penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut :

Kemudian Pada penelitian Hasibuan tahun 2021 dengan judul Pemanfaatan Energi Bayu Sebagai Sumber Energi Listrik Untuk Penerangan Pada Perahu Nelayan, beliau mengatakan Para nelayan kecil menggunakan perahu dalam kegiatannya menangkap ikan ke tengah laut. Banyak dari perahu tersebut tidak dilengkapi dengan

sarana penerangan yang layak. Sampai sejauh ini hanya sumber pangan seperti ikan dan hewan laut lainnya saja yang dimanfaatkan oleh nelayan. Padahal laut memiliki ketersediaan sumber energi yang sangat berlimpah seperti tenaga angin. Turbin angin menjadi pilihan untuk mengkonversi tenaga angin di laut menjadi sumber penerangan perahu nelayan karena lain mudah dibuat, mudah perawatan dan tidak perlu tiang yang tinggi. [2]

Selanjutnya penelitian dari lubis pada tahun 2019 yang mengaplikasikan turbin angin sebagai penggerak awal alternator sebagai pembangkit listrik tenaga angin. Pada penelitiannya di dapat rata-rata tegangan yang dihasilkan dengan menggunakan alternator mobil adalah 1,74 volt dengan arus rata-rata 0,424 ampere dan daya yang dikeluarkan adalah 0,74 watt. Diketahui bahwa semakin cepat putaran alternator yang dilakukan maka akan berakibat pada putaran turbin angin semakin cepat sehingga output tegangan yang dihasilkan alternator juga semakin besar. [3]

Berdasarkan penelitian di atas peneliti menyimpulkan energi angin serta matahari sangat potensial untuk di kembangkan terutama di Sumatera Utara. Berdasarkan penelitian dari Bahramara & Moghaddam pada tahun 2016 dengan judul Perencanaan optimal sistem energi terbarukan hibrida menggunakan HOMER dari fakultas teknik elektro Komputer Universitas Tarbiat Modares, Iran yang mengatakan Konsumsi energi dunia meningkat karena pertumbuhan penduduk dan peningkatan industrial. Sumber daya energi fosil tidak dapat memenuhi persyaratan dengan memperhatikan emisi gas rumah kaca dan biaya siklus hidup yang tinggi sehingga sumber energi terbarukan merupakan alternatif yang tepat bagi sumber daya tradisional untuk

memenuhi peningkatan konsumsi energi, khususnya di bidang ketenagalistrikan. Bahramara & Moghaddam juga mengatakan untuk mengakses biaya investasi dan operasi minimum dan juga memenuhi kendala teknis dan emisi. Salah satu alat paling ampuh untuk tujuan ini adalah perangkat lunak Model Pengoptimalan Hibrid untuk Energi Terbarukan Listrik (HOMER) yang dikembangkan oleh National Renewable Energi Laboratory (NREL), Amerika Serikat. Software ini telah banyak digunakan oleh banyak peneliti di seluruh dunia.[3]

Dalam penelitian Bachtiar & Hayyatul pada tahun 2018 mengatakan pada saat ini bahan bakar fosil masih banyak digunakan untuk memproduksi listrik, dimana bahan bakar tersebut jika terus digunakan akan habis dan susah diperbarui. Dari perancangan sistem PLTB dilakukan di PT. Lentera Angin Nusantara di desa Ciheras, kecamatan Cipatujah, kabupaten Tasikmalaya, Jawa 8 Barat. Sistem pembangkitan menggunakan wind turbine, baterai, converter dan perhitungan dari sistem secara menyeluruh menggunakan software HOMER versi 2.68. Hasil simulasi dengan software HOMER ini bahwa potensi angin dipantai Ciheras ini memiliki potensi angin yang cukup baik untuk membuat Pembangkit Listrik Tenaga Bayu, dimana kecepatan angin yaitu berkisar diantara 3 – 12 m/s. Besar daya listrik yang dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu ini cukup akurat untuk memasok beban listrik, dalam satu tahun Wind turbine dapat menghasilkan rata-rata daya listrik melalui simulasi Homer yaitu 129 W dan dalam perhitungan didapat sebesar 137 W. [5]

Adapun suatu penelitian yang menyatakan Konsumsi listrik Indonesia mengalami peningkatan setiap tahunnya. Salah satu untuk mengatasi masalah tersebut

dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan seperti angin. Pemanfaatan energi ini menggunakan turbin angin yang dipasang pada lokasi yang telah memenuhi syarat. Karena itu, diperlukan informasi kondisi angin di beberapa lapisan dengan menggunakan produk radar seperti CAPPI, PPI, dan HWIND yang diolah menggunakan perangkat lunak Rainbow 5 lalu diinterpretasikan dalam grafik kecepatan angin harian. Data diperoleh dari citra radar Stasiun Meteorologi Kelas II Syamsudin Noor-Banjarmasin. Dan untuk menentukan kondisi batas lapisan angin ditentukan sesuai panjang dari baling-baling turbin untuk memperhitungkan kecepatan angin minimal yang diperlukan untuk menggerakkan baling-baling turbin. Hasil penelitian ini memperlihatkan kondisi angin di lapisan 100 hingga 600 meter cenderung sama, sehingga sulit untuk menentukan ketinggian lapisan angin maksimum dan dari 7 hari sebagai sampel pengamatan didapatkan beberapa kecepatan angin rata-rata perhari antara lain 4.076923 m/s, 4.777778 m/s, 4.393939 m/s, 0,75 m/s, 0.72973 m/s, 3.678571 m/s, dan 1.4375 m/s yang diketahui belum memenuhi persyaratan kecepatan angin minimum yang diperlukan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) untuk menghasilkan energi yang optimal. [19]

Pengubahan energi angin menjadi energi mekanik menjadi listrik yang bermanfaat bagi manusia dilakukan dengan menggunakan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA), sedangkan pengubahan ke listrik disebut SKEA listrik atau turbin angin. Untuk pemanfaatannya, pemilihan sebuah SKEA dilakukan berdasarkan *supply* (potensi angin yang tersedia di suatu lokasi) dan *demand* (penggunaan atau pemanfaatan) sesuai dengan kebutuhan aktual di lokasi tersebut. Besarnya *supply*

pada pembangkit listrik tenaga angin tergantung pada potensi energi angin yang tersedia di lokasi yang dapat dinyatakan dalam rapat daya ( $W/m^2$ ) atau rapat energi ( $KWH/m^2$ ). Sedangkan demand dinyatakan dalam KWH total.[4]

Turbin angin merupakan salah satu solusi untuk mengatasi sumber energi fosil yang semakin terbatas. Energi angin adalah udara yang bergerak yang secara tidak langsung merupakan energi yang berasal dari matahari, karena angin dipengaruhi oleh pemanasan yang dilakukan oleh matahari secara tidak merata di permukaan bumi oleh matahari. Lapisan udara yang menghangatkan mengakibatkan perbedaan tekanan udara di atmosfer. Pengembangan energi terbarukan sangat cocok untuk membantu desa dan perumahan yang mengalami kesulitan pasokan listrik PLN. Eksploitasi energi angin ini sangat baik mengingat angin tidak akan pernah habis atau berkurang, berbeda dengan bahan bakar fosil yang akan habis bila dipakai terus menerus. [5]

Energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin merupakan fungsi dari kecepatan angin dan luas bidang sapuan udara pada sudu - sudu angin (turbine blade). Untuk pembangkit listrik tenaga angin berskala kecil (*small wind Power*) dengan daya 20 – 500 watt, umumnya membutuhkan kecepatan angin rata-rata minimal 4,0 – 4,5 m/s. Secara umum sebagian besar turbin angin mulai menghasilkan daya listrik pada kecepatan angin 4 m/s dan akan berhenti tidak menghasilkan energi pada kecepatan angin 25 m/s.

Turbin angin sumbu tegak merupakan alternatif pembangkit tenaga listrik yang dapat diaplikasikan baik di daerah pesisir maupun perkotaan karena turbin angin jenis sumbu tegak selalu dapat berputar walaupun di daerah yang memiliki tiupan angin

berkecepatan rendah dan berubah-ubah. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya energi listrik yang dihasilkan oleh seperangkat pembangkit listrik tenaga angin dengan kincir tipe horisontal dengan memanfaatkan ketinggian gedung, mengetahui adanya keterkaitan atau hubungan antara kecepatan angin dengan daya output pada pembangkit listrik tenaga angin, dan merancang suatu sistem pembangkit listrik tenaga angin skala kecil yang mampu menghasilkan daya yang optimal. [5]

Prinsip dasar kincir angin adalah mengkonversi tenaga mekanik dari putaran kincir menjadi energi listrik dengan induksi magnetik. Putaran kincir dapat terjadi dengan efektif dengan mengaplikasikan dasar teori aerodinamika pada desain batang kincir. Ketersediaan angin dengan kecepatan yang memadai menjadi faktor utama dalam implementasi teknologi kincir angin. Untuk mendesain sebuah kincir angin, ada banyak hal yang harus diperhatikan. Hal pertama yang harus dipertimbangkan yaitu berapa besar daya yang kita butuhkan, kemudian kecepatan angin, setelah itu yang tidak kalah penting yaitu berapa jumlah blade (bilah kincir) yang harus digunakan, dan masih banyak hal teknis lainnya.

Turbin angin atau dalam bahasa sederhana kincir angin merupakan turbin yang digerakkan oleh angin, yaitu udara yang bergerak di atas permukaan bumi. Sudah sejak dahulu angin berjasa bagi kehidupan manusia, salah satunya adalah para nelayan. Selain itu, turbin angin pada awalnya juga dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, memompa air dan menggiling jagung. Penggunaan turbin angin terus mengalami perkembangan guna

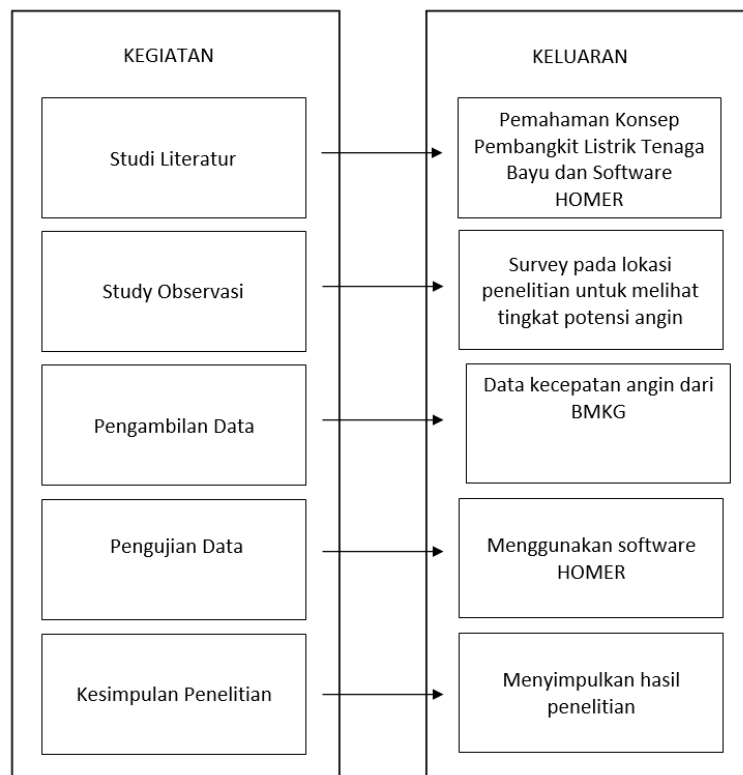
memanfaatkan energi angin secara efektif, terutama pada daerah - daerah dengan aliran angin yang relatif tinggi sepanjang tahun. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negaranegara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan Windmill. Pengkajian potensi angin harus dilakukan dengan baik guna memperoleh suatu sistem konversi angin yang tepat. Pengkajian potensi angin pada suatu daerah dilakukan dengan cara mengukur serta menganalisa kecepatan maupun arah angin. Dasar dari alat untuk merubah energi angin adalah kincir angin. Meskipun masih terdapat susunan dan perencanaan yang beragam, biasanya kincir angin digolongkan menjadi dua tipe (horisontal dan vertikal) dan yang paling banyak digunakan adalah kincir jenis horizontal. Kincir jenis ini mempunyai rotasi horisontal terhadap tanah (secara sederhana yaitu sejajar dengan arah tiupan angin). [23]

Penelitian yang menggunakan metode eksperimen menunjukkan hasil penelitian kincir angin mampu mengikuti datangnya arah angin sehingga hasil yang diperoleh cukup maksimal. Adapun hasil pengukuran angin yang berlokasi didepan gedung laboratorium jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tidar diperoleh rata-rata kecepatan angin sebesar 1,53 m/s dan tidak mampu menghasilkan tegangan keluaran, sedangkan untuk penempatan lokasi kincir diatas gedung lantai 4 Fakultas Ekonomi Universitas Tidar rata-rata kecepatan angin diperoleh 5,52 m/s dan dapat menghasilkan tegangan keluaran 78,47 Volt Ac. Generator akan menghasilkan tegangan keluaran minimal kecepatan angin sebesar 2,5 m/s. Daya yang dihasilkan 172 Watt dengan efisiensi daya *inverter* sebesar 80% atau 138,24 Watt. [24]



### 2.2.9 Kerangka Berfikir

Untuk membantu dalam penyusunan penelitian ini, maka diperlukan adanya susunan kerangka berpikir yang jelas tahapannya. Kerangka ini merupakan langkah – langkah yang akan dilakukan dalam penyelesaian masalah yang akan dibahas. Adapun langkah – langkah dari kerangka berpikir dalam penelitian ini akan dijelaskan pada gambar 2.13



Gambar 2.14 Kerangka Berfikir

Dari gambar 2.8 yaitu tentang kerangka berpikir yang dimulai dari study literatur yang didapat dari jurnal – jurnal penelitian serupa terdahulu. Kemudian dilanjutkan dengan observasi yang meliputi survey pada lokasi penelitian. Kemudian dilakukan

pengambilan data, adapun data yang diambil adalah data total beban yang digunakan pada lokasi penelitian, data pemakaian listrik. Selanjutnya adalah proses analisis dan perencanaan yang dibantu oleh software HOMER untuk mempermudah dalam menentukan kapasitas PLTB . selanjutnya kesimpulan pada penelitian yang dilakukan.

## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

Bab ini meliputi waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan. Pada prosedur penelitian akan dilakukan beberapa langkah pengujian untuk pengambilan data kecepatan arah mata angin, penyamaan skala alat ukur, keluaran dayanya, penjelasan lebih rinci tentang metodologi penelitian akan dipaparkan sebagai berikut :

#### **2.2 Waktu dan tempat penelitian**

Waktu pelaksanaan penelitian ini dilakukan dalam waktu 8 bulan terhitung dari tanggal 27 Mei 2022 sampai 11 November 2022. Dimulai dengan persetujuan proposal ini sampai selesai penelitian. Penelitian ini dilaksanakan di Blangkejeran Kabupaten Gayo Lues

#### **2.3 Tahapan percobaan**

Tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah studi literature, Studi literature dimaksudkan untuk mempelajari berbagai sumber referensi atau berbagai teori dari jurnal penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan menganalisa hubungan antara kecepatan angin dan suhu terhadap daya yang dikeluarkan pembangkit listrik tenaga angin.

## 2.4 Alir Penelitian

### a. Studi Literature

Dalam studi literature ini dilakukan pencarian informasi atau bahan berupa materi baik dari jurnal maupun dari internet dan sumber-sumber lain yang berkaitan dengan penelitian ini. Materi tersebut diantaranya mengenai penelitian tentang turbin angin sebagai penggerak mula dan generator DC yang menghasilkan listrik

### b. Persiapan

Setelah melakukan studi literature, kemudian memepersiapkan segala sesuatu yang berkaitan dengan penelitian ini. Beberapa persiapan yang akan dilakukan adalah seperti software untuk membantu proses analisis

### c. Pengambilan Data

Setelah melakukan persiapan selanjutnya adalah pengambilan data kecepatan angin pada lokasi penelitian. Data yang digunakan adalah dari NASA yang diambil melalui software HOMER

### d. Analisa Data

Setelah dilakukan pengambilan data selanjutnya adalah melakukan analisis potensi energi angin pada lokasi penelitian untuk pemanfaatan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB)

### e. Kesimpulan

Dari data yang sudah diperoleh dan diolah dalam bentuk tabel dapat diambil beberap kesimpulan penelitian

## 2.5 Teknik Pengambilan Data

Demi mendukung penelitian ini, adapun data yang diperlukan adalah sebagai berikut :

### a. Data Kecepatan Angin

Nilai kecepatan angin pada lokasi penelitian. Nilai kecepatan ini didapat melalui sample pengukuran manual dan menggunakan aplikasi HOMER. Untuk pengukuran manual digunakan alat naometer, untuk data menggunakan aplikasi HOMER telah menyediakan data kecepatan angin dari tiap – tiap daerah yang ada di lokasi penelitian

### b. Data beban yang digunakan adalah beban perumahan secara umum yang digunakan. Data di dapat melalui aplikasi HOMER

## 2.6 Teknik Analisis

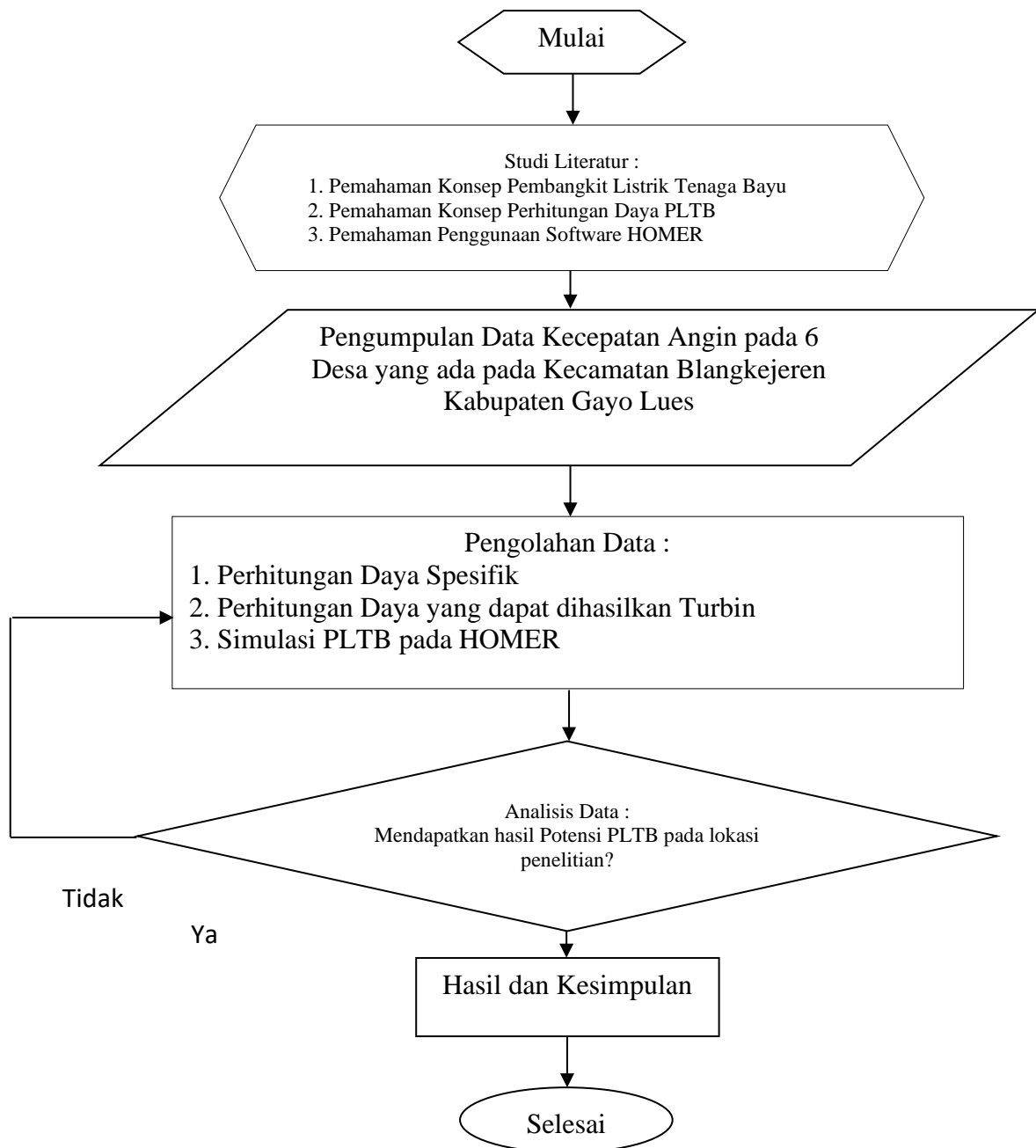
Dari data yang telah dikumpulkan, maka langkah selanjutnya adalah proses analisis data yang ada. Adapun langkah – langkah teknik analisis data pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Data kecepatan angin diambil melalui aplikasi HOMER, dimana diambil data kecepatan angin dari 6 desa sebagai sampel.
2. Dari data kecepatan angin yang ada akan dihitung nilai daya efektif yang dapat dihasilkan sesuai dengan kecepatan angin yang ada.

3. Kemudian dilakukan simulasi percobaan untuk perencanaan PLTB pada lokasi penelitian untuk melihat secara detail potensi dari PLTB tersebut.

## 2.7 Flowchart analisa data penelitian

Adapun proses berlangsungnya analisa data ini akan dijelaskan dalam bentuk alur diagram berikut ini :



Gambar 3.2 Diagram alir analisa data penelitian.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Potensi Kecepatan Angin

Pada potensi kecepatan angin akan diambil beberapa sample pada kecamatan blangkejeren kabupaten gayo lues. Dari 12 Desa akan diambil data kecepatan angin dari 6 desa sebagai sample.

##### 4.1.1 Kecepatan Angin Pada Desa

###### a. Blangkejeren Kota

Adapun hasil kecepatan angin pada Blangkejeren kota dapat dilihat pada Table 4.1

Sebagai berikut :

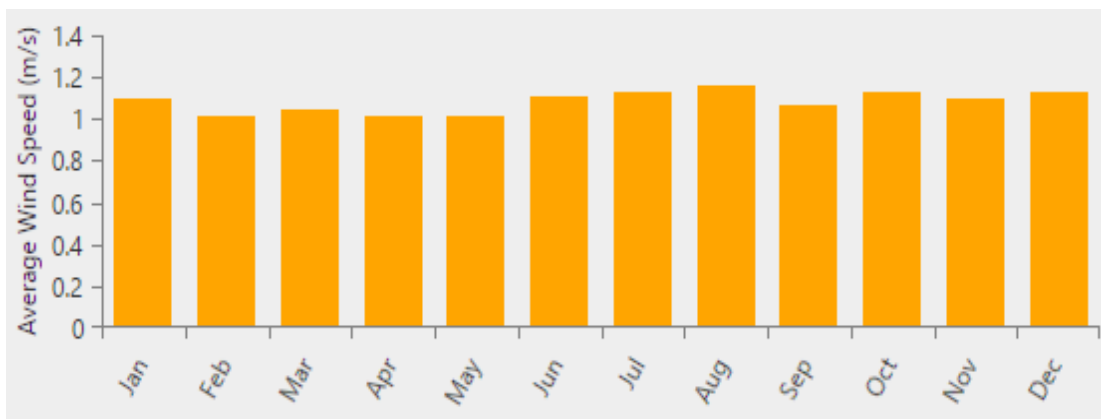
Tabel 4.1 Kecepatan Angin Blangkejeren Kota

Bulan	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	1.100
Februari	1.010
Maret	1.050
April	1.010
Mei	1.010
Juni	1.110
Juli	1.130
Agustus	1.160
September	1.070
Oktober	1.130
November	1.100
Desember	1.130

Koordinat : X8WR+MJQ Blangkejeren Kota, Gayo Lues Regency, Aceh 24653,  
Indonesia (3°59.8'N, 97°20.5'E)



Dari data yang diperoleh dapat dilihat kecepatan angin tertinggi pada bulan Agustus yaitu 1,16 m/s, sedangkan kecepatan angin paling rendah yaitu 1,01 pada bulan Februari dan Mei. Sedangkan rata – rata kecepatan angin dalam kurun waktu selama satu tahun pada Blangkejeren Kota adalah 1,08 m/s. adapun grafik tingkat kecepatan angin setiap bulannya yang diambil dari aplikasi HOMER yaitu sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Angin Selama 1 Tahun Blangkejeren Kota

#### b. Desa Kampung Jawa

Adapun hasil kecepatan angin pada Desa Kampung Jawa dapat dilihat pada Table 4.2 Sebagai berikut :

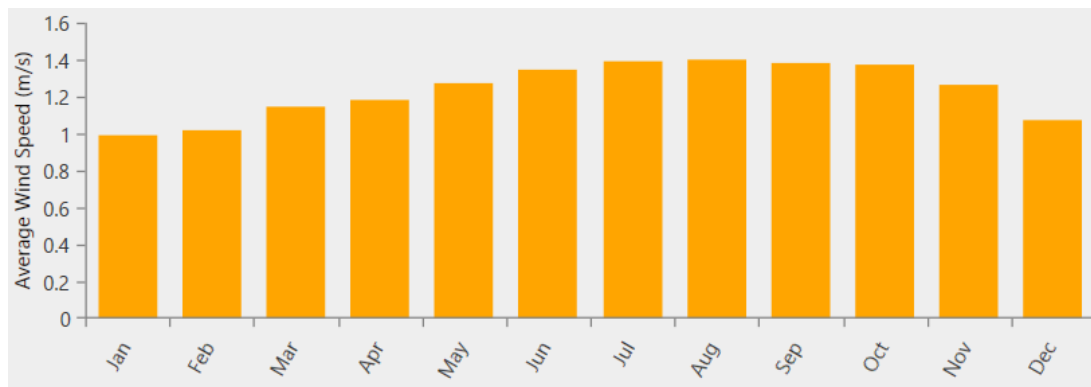
Tabel 4.2 Kecepatan Angin Desa Kampung Jawa

Bulan	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	0.990

Bulan	Kecepatan Angin (m/s)
Februari	1.020
Maret	1.150
April	1.180
Mei	1.270
Juni	1.350
Juli	1.390
Agustus	1.400
September	1.380
Oktober	1.370
November	1.260
Desember	1.070

Koordinat : X8V+F6G Kp. Jawan Kec. Blangkejeren, Gayo Lues Regency, Aceh 24653, Indonesia (3°59.6'N, 97°20.0'E)

Dari data yang diperoleh dapat dilihat kecepatan angin tertinggi pada bulan Agustus yaitu 1,4 m/s, sedangkan kecepatan angin paling rendah yaitu 0,9 m/s pada bulan Januari. Sedangkan rata – rata kecepatan angin dalam kurun waktu selama satu tahun pada Desa Kampung Jawa adalah 1,24 m/s. adapun grafik tingkat kecepatan angin setiap bulannya yang diambil dari aplikasi HOMER yaitu sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Angin Selama 1 Tahun Desa Kampung Jawa

c. Desa Leme

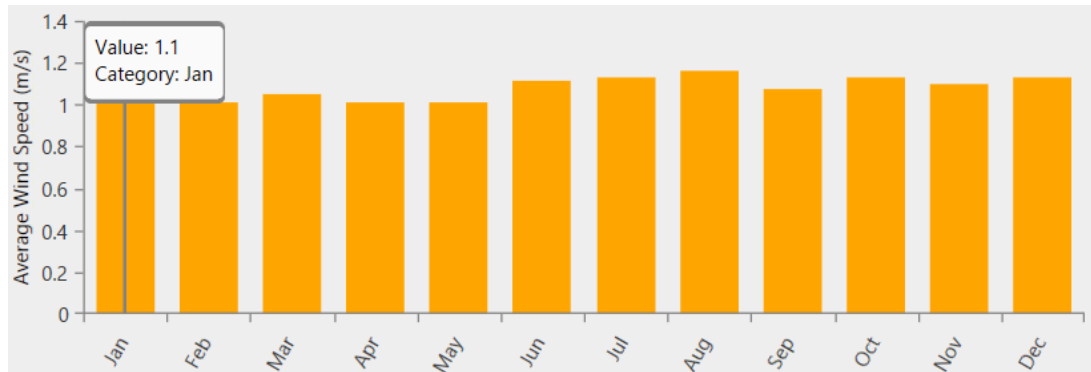
Adapun hasil kecepatan angin pada Desa Leme dapat dilihat pada Table 4.2 Sebagai berikut :

Tabel 4.3 Kecepatan Angin Desa Leme

Bulan	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	0.990
Februari	1.020
Maret	1.100
April	1.010
Mei	1.050
Juni	1.010
Juli	1.010
Agustus	1.110
September	1.130
Oktober	1.160
November	1.070
Desember	1.130

Koordinat : X8V+F6G Leme Kec. Blangkejeren, Gayo Lues Regency, Aceh 24653, Indonesia (4°2.0'N , 97°20.3'E)

Dari data yang diperoleh dapat dilihat kecepatan angin tertinggi pada bulan Oktober yaitu 1,16 m/s, sedangkan kecepatan angin paling rendah yaitu 0,9 m/s pada bulan Januari. Sedangkan rata – rata kecepatan angin dalam kurun waktu selama satu tahun pada Desa Leme 1,08 m/s. adapun grafik tingkat kecepatan angin setiap bulannya yang diambil dari aplikasi HOMER yaitu sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Angin Selama 1 Tahun Desa Leme

d. Kute Sere

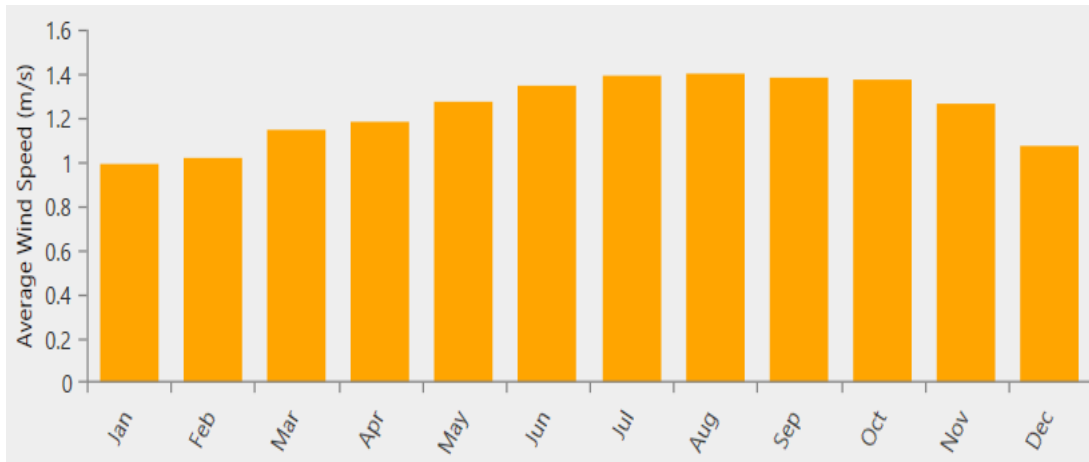
Adapun hasil kecepatan angin pada Kute Sere dapat dilihat pada Table 4.2 Sebagai berikut :

Tabel 4.4 Kecepatan Angin Kute Sere

Bulan	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	0.990
Februari	1.020
Maret	1.150
April	1.180
Mei	1.270
Juni	1.350
Juli	1.390
Agustus	1.400
September	1.380
Oktober	1.370
November	1.260
Desember	1.070

Koordinat : X89R+MV8 Kute Sere Kec. Blangkejeren, Gayo Lues Regency, Aceh 24653, Indonesia (3°58.2'N , 97°20.5'E)

Dari data yang diperoleh dapat dilihat kecepatan angin tertinggi pada bulan Agustus yaitu 1,4 m/s, sedangkan kecepatan angin paling rendah yaitu 0,99 m/s pada bulan Januari. Sedangkan rata – rata kecepatan angin dalam kurun waktu selama satu tahun pada Kute Sere 1,24 m/s. adapun grafik tingkat kecepatan angin setiap bulannya yang diambil dari aplikasi HOMER yaitu sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Angin Selama 1 Tahun Kute Sere

e. Desa Cempa

Adapun hasil kecepatan angin pada Desa Cempa dapat dilihat pada Table 4.5 Sebagai berikut :

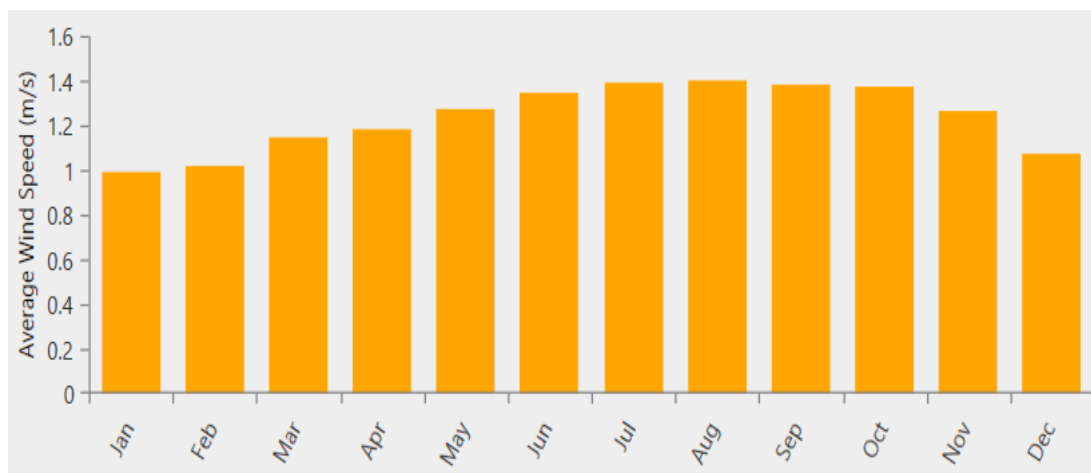
Tabel 4.5 Kecepatan Angin Desa Cempa

Bulan	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	0.990
Februari	1.020

Bulan	Kecepatan Angin (m/s)
Maret	1.150
April	1.180
Mei	1.270
Juni	1.350
Juli	1.390
Agustus	1.400
September	1.380
Oktober	1.370
November	1.260
Desember	1.070

Koordinat : X9G4+M74 Cempa Kec. Blangkejeren, Gayo Lues Regency, Aceh 24653, Indonesia (3°58.6'N , 97°21.3'E)

Dari data yang diperoleh dapat dilihat kecepatan angin tertinggi pada bulan Agustus yaitu 1,4 m/s, sedangkan kecepatan angin paling rendah yaitu 0,99 m/s pada bulan Januari. Sedangkan rata – rata kecepatan angin dalam kurun waktu selama satu tahun pada Desa Cempa 1,24 m/s. adapun grafik tingkat kecepatan angin setiap bulannya yang diambil dari aplikasi HOMER yaitu sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Angin Selama 1 Tahun Desa Cempa

f. Desa Sepang

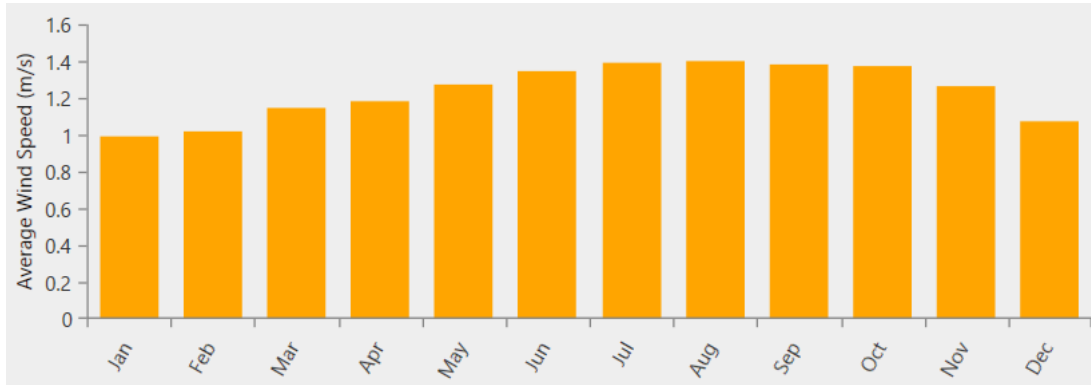
Adapun hasil kecepatan angin pada Desa Sepang dapat dilihat pada Table 4.5 Sebagai berikut :

Tabel 4.6 Kecepatan Desa Sepang

Bulan	Kecepatan Angin (m/s)
Januari	0.990
Februari	1.020
Maret	1.150
April	1.180
Mei	1.270
Juni	1.350
Juli	1.390
Agustus	1.400
September	1.380
Oktober	1.370
November	1.260
Desember	1.070

Koordinat : X9G4+M74 Sepang Kec. Blangkejeren, Gayo Lues Regency, Aceh 24653, Indonesia (3°59.0'N , 97°21.3'E)

Dari data yang diperoleh dapat dilihat kecepatan angin tertinggi pada bulan Agustus yaitu 1,4 m/s, sedangkan kecepatan angin paling rendah yaitu 0,99 m/s pada bulan Januari. Sedangkan rata – rata kecepatan angin dalam kurun waktu selama satu tahun pada Desa Cempa 1,24 m/s. adapun grafik tingkat kecepatan angin setiap bulannya yang diambil dari aplikasi HOMER yaitu sebagai berikut :



Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Angin Selama 1 Tahun Kute Sere

#### 4.1.2 Potensi Daya Spesifik

Energi angin dapat di konversi atau di transfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Berikut merupakan data-data hasil perhitungan dimana daya angin berbanding lurus dengan kerapatan udara. Untuk mencari nilai daya spesifik digunakan persamaan 2.3, Dari pengambilan sampel data sebanyak 6 lokasi pada Kecamatan Blangkejeren Kabupaten Gayo Lues Aceh dapat diketahui daya spesifik pada setiap titik lokasi pengambilan data adalah :

- a. Blangkejeren Kota

$$\begin{aligned}
 P_s &= \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 1,08^3 \cdot 1,2 \\
 &= 0,75 \text{ Watt/m}^2
 \end{aligned}$$

- b. Desa Kampung Jawa

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho$$



$$= \frac{1}{2} \cdot 1,24^3 \cdot 1,2$$

$$= 1,14 \text{ Watt/m}^2$$

c. Desa Leme

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,08^3 \cdot 1,2$$

$$= 0,75 \text{ Watt/m}^2$$

d. Desa Kute Sere

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,24^3 \cdot 1,2$$

$$= 1,14 \text{ Watt/m}^2$$

e. Desa Cempa

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,24^3 \cdot 1,2$$

$$= 1,14 \text{ Watt/m}^2$$

f. Desa Sepang

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,24^3 \cdot 1,2$$

$$= 1,14 \text{ Watt/m}^2$$

Maka dari hasil perhitungan daya spesifik pada masing – masing desa yang telah diambil data dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut :

Tabel 4.7 Hasil Pengambilan Data Sampel

Lokasi	Rata – Rata Kecepatan Angin (m/s)	Daya Spesifik (Watt/m <sup>2</sup> )
Blangkejeren Kota	1,08	0,75
Kampung Jawa	1,24	1,14
Desa Lame	1,08	0,75
Kute Sere	1,24	1,14
Cempa	1.24	1,14
Sepang	1,24	1,14
<b>Rata - Rata</b>	1,176	1.01

Dapat dilihat pada Tabel 4.7 kecepatan angin yang dihasilkan oleh masing – masing tempat relatif kecil yaitu tidak mencapai 2 m/s. rata – rata dari data sampel yang diambil yaitu hanya sebesar 1,176 m/s. Tabel di atas menunjukkan variasi potensi energi angin disetiap desa tidak jauh berbeda. Daerah yang memiliki kecepatan angin yang tinggi Berbanding lurus dengan potensi daya yang dihasilkan.

Dapat dilihat pada ke-6 desa lokasi penelitian merupakan daerah yang kurang potensial untuk pemanfaatan PLTB. Untuk memanfaatkan potensi energi angin dibawah 5 m/s yang diterima poros turbin kincir, diperlukan turbin angin poros horizontal, generator berdaya besar yang dapat menghasilkan daya listrik besar dan didukung dengan teknologi yang baik, seperti menggunakan sistem untuk pengaturan turbin terhadap kecepatan angin dan arah angin yaitu aktif stall control. Kemudian

untuk mengantisipasi kelemahan fluktuasi keberadaan angin serta menjaga kontinuitas penyaluran daya dan faktor kapasitas dapat diantisipasi dengan sistem penyimpanan menggunakan baterai, atau dapat menggunakan sistem on-grid. [23]

#### 4.2 Pemilihan Teknologi Turbin

Pada lokasi penelitian dapat dilihat potensi angin yang ada sangatlah kecil, tidak mencapai 2 m/s. maka teknologi turbin yang digunakan adalah yang sesuai dengan standar dibawah 5 m/s (kecepatan angin minimal untuk berpotensi). Diasumsikan digunakan turbin dengan teknologi kecepatan angin dibawah 5 m/s dengan kapasitas 10 kW. Adapun spesifikasi turbin yang diasumsikan kedalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 4.3 Spesifikasi Turbin Angin [24]

Tipe Turbin	Vertikal
Daya Keluaran Maksimal	10 Kw
Kecepatan Angin Minimal	2.0 m/s
Kecepatan Angin Terbaik	10 m/s
Kecepatan Angin Maksimal	50 m/s
Efisiensi Generator	80%
Kebisingan	< 45 Db
Berat Turbin	78 kg
Material Baling – Baling	Aluminium Alloy
Jumlah Baling – Baling	2
Diameter Turbin	9,2 m
Luas Sapuan Turbin	84,64 m
Berat Turbin	42 Kg

Dengan asumsi penggunaan turbin yang ada pada Tabel 4.3 maka dapat dihasilkan potensi angin pada lokasi penelitian pada Tabel 4.4 berikut :

a. Blangkejeren Kota

Masa Udara : (Pers. 2.7)

$$\begin{aligned} m &= \rho \cdot A \cdot v \\ &= 1,225 \cdot 84,64 \cdot 1,08 \\ &= 111,98 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Energi Kinetik : (Pers. 2.6)

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 111,98 \cdot 1,08^2 \\ &= 65,3 \text{ Joule} \end{aligned}$$

Daya Turbin : (Pers. 2.8)

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho \cdot A \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,08^3 \cdot 1,2 \cdot 86,64 \\ &= 64,98 \text{ Watt} \end{aligned}$$

b. Desa Kampung Jawa

Masa Udara : (Pers. 2.7)

$$\begin{aligned} m &= \rho \cdot A \cdot v \\ &= 1,225 \cdot 84,64 \cdot 1,24 \\ &= 128,56 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Energi Kinetik : (Pers. 2.6)

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 128,56 \cdot 1,24^2 \\ &= 98,84 \text{ Joule} \end{aligned}$$

Daya Turbin : (Pers. 2.8)

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho \cdot A \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,24^3 \cdot 1,2 \cdot 86.64 \\ &= 98,76 \text{ Watt} \end{aligned}$$

c. Desa Leme

Masa Udara : (Pers. 2.7)

$$\begin{aligned} m &= \rho \cdot A \cdot v \\ &= 1,225 \cdot 84,64 \cdot 1,08 \\ &= 111,98 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Energi Kinetik : (Pers. 2.6)

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 111,98 \cdot 1,08^2 \\ &= 65,3 \text{ Joule} \end{aligned}$$

Daya Turbin : (Pers. 2.8)

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho \cdot A \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,08^3 \cdot 1,2 \cdot 86.64 \end{aligned}$$

$$= 64,98 \text{ Watt}$$

d. Desa Kute Sere

Masa Udara : (Pers. 2.7)

$$m = \rho \cdot A \cdot v$$

$$= 1,225 \cdot 84,64 \cdot 1,24$$

$$= 128,56 \text{ kg/s}$$

Energi Kinetik : (Pers. 2.6)

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 128,56 \cdot 1,24^2$$

$$= 98,84 \text{ Joule}$$

Daya Turbin : (Pers. 2.8)

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho \cdot A$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1,24^3 \cdot 1,2 \cdot 86,64$$

$$= 98,76 \text{ Watt}$$

e. Desa Cempa

Masa Udara : (Pers. 2.7)

$$m = \rho \cdot A \cdot v$$

$$= 1,225 \cdot 84,64 \cdot 1,24$$

$$= 128,56 \text{ kg/s}$$

Energi Kinetik : (Pers. 2.6)

$$\begin{aligned}
 E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 128,56 \cdot 1,24^2 \\
 &= 98,84 \text{ Joule}
 \end{aligned}$$

Daya Turbin : (Pers. 2.8)

$$\begin{aligned}
 P_a &= \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho \cdot A \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 1,24^3 \cdot 1,2 \cdot 86.64 \\
 &= 98,76 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

f. Desa Sepang

Masa Udara : (Pers. 2.7)

$$\begin{aligned}
 m &= \rho \cdot A \cdot v \\
 &= 1,225 \cdot 84,64 \cdot 1,24 \\
 &= 128,56 \text{ kg/s}
 \end{aligned}$$

Energi Kinetik : (Pers. 2.6)

$$\begin{aligned}
 E_k &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 128,56 \cdot 1,24^2 \\
 &= 98,84 \text{ Joule}
 \end{aligned}$$

Daya Turbin : (Pers. 2.8)

$$\begin{aligned}
 P_a &= \frac{1}{2} \cdot v^3 \cdot \rho \cdot A \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 1,24^3 \cdot 1,2 \cdot 86.64 \\
 &= 98,76 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Maka dari hasil perhitungan diatas didapat Tabel potensi energi angin pada okasi penelitian yang diasumsikan menggunakan turbin kapasitas 10 kW adalah sebagai berikut :

Tabel 4.4 Potensi Angin

Turbin Poros Vertikal				
Nama Desa	Rata – Rata Kecepatan Angin (m/s)	Masa Udara (kg/s)	Energi Kinetik (Joule)	Daya Yang Dihasilkan Turbin (Watt)
Blangkejeren Kota	1,08	111,98	65,3	64,98
Kampung Jawa	1,24	128,56	98,84	98,76
Leme	1,08	111,98	65,3	64,98
Kute Sere	1,24	128,56	98,84	98,76
Cempa	1,24	128,56	98,84	98,76
Sepang	1,24	128,56	98,84	98,76

Tabel 4.4 di atas merupakan hasil perhitungan potensi daya dan energi yang dihasilkan per satuan luas jika digunakan turbin angin poros vertical dengan asumsi luas sapuan turbin  $84 \text{ m}^2$  serta berbagai komponen turbin angin yang ada pada asumsi sebelumnya.

Dari hasil yang terdapat pada tabel di atas menunjukkan variasi potensi energi angin disetiap daerahnya tidak jauh berbeda. Kecepatan angin yang ada pada tiap – tiap desa berbanding lurus dengan potensi daya yang dihasilkan. Dari ke-6 desa yang diambil sebagai sampel, tidak ada desa yang cukup berpotensi untuk PLTB



dikarenakan daya yang dihasilkan sangat kecil untuk pemanfaatan turbin berkapasitas 10 kW. Kecepatan angin rata – rata pada tiap daerah hanya sebesar 1.176 m/s berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan sangatlah kecil.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil dari penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini maka didapat kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari data yang diperoleh dapat dilihat dari 6 titik lokasi penelitian kecepatan angin yang dihasilkan oleh masing – masing tempat relatif kecil yaitu tidak mencapai 2 m/s. rata – rata dari data sampel yang diambil yaitu hanya sebesar 1,176 m/s.
2. Dengan rata – rata kecepatan angin yang relatif kecil, maka daya spesifik yang dihasilkan juga relatif kecil memiliki rata – rata sebesar 1.01 Watt/m<sup>2</sup>. Dengan masa udara rata – rata 128,56 kg/s dan energi kinetik yang dihasilkan sebesar 98,84 Joule. Maka daya yang dapat dibangkitkan oleh turbin yang diasumsikan berkapasitas 10 kW hanya sebesar 98,76 Watt.
3. Pembangkit listrik tenaga angin pada kecamatan blangkejeren aceh belum memiliki potensi angin yang baik dikarenakan tingkat kecepatan angin dan energi yang dihasilkan relatif kecil.

#### **5.2 Saran**

1. Diharapkan penelitian selanjutnya dapat menggunakan jenis software yang berbeda agar mendapatkan perbandingan dan hasil yang lebih akurat

- 
2. Diharapkan dalam penelitian yang serupa menggunakan jenis energi baru terbarukan yang berbeda sehingga mendapatkan hasil yang lebih baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hasibuan, A., Siregar, W. V., Setiawan, A., & Daud, M. (2021). Pemanfaatan Energi Bayu Sebagai Sumber Energi Listrik Untuk Penerangan Pada Perahu Nelayan. 85–88.
- [2] Lubis, S., Lubis, F., & Harahap, P. (2019). PLTB Sebagai Alternatif Energi Baru Terbarukan. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri.
- [3] A. Bachtiar and W. Hayyatul, “Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras,” *J. Tek. Elektro ITP*, vol. 7, no. 1, pp. 34–45, 2018, doi: 10.21063/jte.2018.3133706.
- [4] Hidayatullah, Nur Asyik Ningrum, Hanifah Nur Kumala, “Optimalisasi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin Turbin Sumbu Horizontal dengan Menggunakan Metode Maximum Power Point Tracker”, *JEECAE (Journal of Electrical, Electronics, Control, and Automotive Engineering)*, Vol 1, No. 1, 2017 Hal 7-12
- [5] Ananta, Henry Purbawanto, Sugeng, “Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dan Surya Skala Kecil Untuk Daerah Perbukitan”, Vol. 12, No. 1, 2014 Hal 16-22
- [6] Bachtiar, Antonov Hayyatul, Wahyudi, “Analisis Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Angin PT. Lentera Angin Nusantara (LAN) Ciheras”, *Jurnal Teknik Elektro ITP*, vol. 7, No.1, Januari 2018 Hal 34-45
- [7] Manullang Tua Ragidup, N. Agung, and S. W. Enda, “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Software Homer Di Departemen Teknik Industri Universitas Diponegoro,” vol. 9, no. 2, pp. 148–156, 2020.
- [8] R. T. Jurnal, “Analisis Kelayakan Turbin Angin Kecepatan Rendah Tipe Nt1000W Di Wilayah Terpencil,” *Energi & Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 84–93, 2019, doi: 10.33322/energi.v10i1.332.

- [9] F. Al Muhajir and N. Sinaga, "Tinjauan Pemanfaatan Energi Bayu Sebagai Pembangkit Listrik di Provinsi Sulawesi Selatan," *J. Tek.*, vol. 15, no. x, pp. 55–61, 2021.
- [10] M. Nuryogi and Subiyanto, "Performa Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Terhubung Grid Pada Pembebanan Dinamis," *Renew. Energy J.*, vol. 8, no. 2, p. 50, 2019.
- [11] H. Kurniadi, A. D. Yuliani, I. A. Khairunnisa, S. S. Putri, E. Wardoyo, and I. R. Nugraheni, "Survei Penempatan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu Di Tanah Laut Berdasarkan Citra Radar Banjarmasin," *Pros. SNFA (Seminar Nas. Fis. dan Apl.*, vol. 4, p. 129, 2019, doi: 10.20961/prosidingsnfa.v4i0.35920.
- [12] I. P. Riasa, R. S. Hartati, I. B. G. Manuaba, and D. A. S. Santiari, "Pengaruh PLTB Sidrap Terhadap Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan," *Maj. Ilm. Teknol. Elektro*, vol. 19, no. 1, p. 27, 2020, doi: 10.24843/mite.2020.v19i01.p04.
- [13] H. Desrizal and I. H. Rosma, "Analisis Ketersediaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB) dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," *Jom FTEKNIK*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [14] I. Nawawi and B. Fatkhurrozi, "Sistem pembangkit listrik tenaga angin skala kecil pada bangunan bertingkat," pp. 2–7, 2017.
- [15] J. A. Wurangian, Meita Rumbayan, and Novi M. Tulung, "Jurnal\_Skripsi\_-\_Jufo\_Wurangian Perancangan Home System Menggunakan," *Jur. Tek. Elektro*, pp. 1–7, 2021.
- [16] I. Muhammad, "Pembuatan sistem pembangkit listrik tenaga angin berkapasitas 100 watt," *Tek. Elektro*, pp. 1–30, 2018.
- [17] Bachtiar, a., & hayyatul, w. (2018). Analisis potensi pembangkit listrik tenaga angin pt. Lentera angin nusantara (lan) ciheras. *Jurnal teknik elektro itp*, 7(1), 34–45. <https://doi.org/10.21063/jte.2018.3133706>
- [18] Nuarsa, m., teknik, j., fakultas, m., & universitas, t. (2013). Terhadap unjuk kerja turbin angin poros horizontal. 3(1), 50–59.

- [19] Ksergi, e. (2019). Rancang bangun turbin angin poros horizontal. 15(3), 132–138.
- [20] Ahmad Wahin, Ir Junaidi, M Iqbal Arsyad (2018) “Analisis Kapasitas Dan Kebutuhan Daya Listrik Untuk Menghemat Penggunaan Energi Listrik Di Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura” Program Studi Teknik Elektro Universitas Tanjung Pura Pontianak
- [21] Nanang Setiaji, Ir Sumpena, Agus Sugiharto (2020) “Analisis Konsumsi Daya Dan Distribusi Tenaga Listrik” 3Jurusan Teknik Elektro, Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma
- [22] Pamela Simamora (2019) “ Kebijakan Tarif Listrik Indonesia” Koordinator Tim Riset Di Institute For Essential Services Reform (IESR) Energi Terbarukan Dan Sistem Tenaga Listrik.
- [23] Adhi Prasetyo, Didik Notosudjono, Hasto Soebagja “Studi Potensi Penerapan Dan Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Di Indonesia” Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik-Universitas Pakuan,2020
- [24] Sulisty Atmadi, Ahmad Jamaludin Fitro “Rancang Bangun Rotor Turbin Angin 10 KW untuk memperoleh Daya Optimum pada variasi Jumlah dan Diameter Sudu” Jurnal Teknologi Dirgantara Vol.7 No.2 Desember 2009 101-111