

## **BAB II**

### **KAJIAN TEORI**

#### **2.1. Kerangka Teori**

##### **2.1.1. Studi Kelayakan (Feasibility Study)**

###### **2.1.1.1. Definisi Studi Kelayakan (Feasibility Study)**

Menurut Sutrisno Studi Keyakan (Feasibility study) adalah suatu studi atau pengkajian apakah suatu usulan proyek/gagasan usaha apabila dilaksanakan dapat berjalan dan berkembang sesuai dengan tujuannya atau tidak. Objek atau subject matters studi kelayakan adalah usulan proyek/gagasan usaha. Usulan proyek/gagasan usaha tersebut dikaji, diteliti, dan diselidiki dari berbagai aspek tertentu apakah memenuhi persyaratan untuk dapat berkembang atau tidak. Dalam studi kelayakan yang distudi (diteliti) misalnya aspek pemasaran, aspek tehnik, aspek proses termasuk input, output dan pemasaran, aspek komersial, aspek yuridis, aspek social budaya, aspek paedagogis dan aspek ekonomi.

Sementara itu, Yacob Ibrahim mengemukakan bahwa Studi Kelayakan (feasibility study) adalah kegiatan untuk menilai sejauh mana manfaat yang dapat diperoleh dalam melaksanakan suatu kegiatan usaha /proyek dan merupakan bahan pertimbangan dalam mengambil suatu keputusan, apakah menerima atau menolak dari suatu gagasan usaha /proyek yang direncanakan. Pengertian layak dalam penilaian ini adalah kemungkinan dari gagasan usaha/proyek yang akan dilaksanakan memberikan manfaat (benefit), baik dalam arti financial benefit maupun dalam arti social benefit. Layaknya suatu gagasan usaha/proyek dalam arti social benefit tidak selalu menggambarkan dalam arti financial benefit, hal ini tergantung dari segi penilaian yang dilakuka.

Dari kedua pendapat tentang pengertian Studi Kelayakan diatas dapatlah disimpulkan bahwa studi kelayakan adalah kegiatan menganalisa, mengkaji dan meneliti berbagai aspek tertentu suatu gagasan usaha/proyek yang akan dilaksanakan atau telah dilaksanakan, sehingga memberi gambaran layak (feasible-go) atau tidak layak (no feasible-no go) suatu gagasan usaha/proyek apabila ditinjau dari manfaat yang dihasilkan (benefit) dari proyek/gagasan usaha tersebut baik dari sudut financial benefit maupun social benefit.

#### **2.1.1.2. Tahapan Studi Kelayakan**

Tujuan setiap studi kelayakan adalah mengadakan penilaian terhadap suatu gagasan usaha/proyek. Penilaian tersebut kemudian dianalisis dan dievaluasi atau dibandingkan dengan yang baik atau dengan yang ideal termasuk dibandingkan dengan tujuan yang hendak dicapai, persyaratan yang bai serta standar yang seharusnya.

Sutrisno (1982;75) menyatakan, dalam melakukan analisa studi kealayanan terbagi atas beberapa tahap yaitu :

##### **1. Tahap Persiapan**

Tahap ini adalah tahap untuk menentukan apakah studi kelayakan untuk suatu atau beberapa usulan proyek perlu diadakan atau tidak. Pada tahap ini merupakan bahagian dari desain penelitian (Research Design) yang meliputi seluruh proses perencanaan dan pelaksanaan studi penelitian.

## 2. Tahap Penelitian

Tahap penelitian adalah tahap bekerja dilapangan untuk pengumpulan data baik kuantitatif maupun kualitatif.

## 3. Tahap Tabulasi dan Penyusunan Data

Tahap ini sesungguhnya tidak memerlukan tersendiri melainkan dapat dilakukan segera setelah penelitian dimulai. Sesudah mendapatkan data, data dikukmpulkan dan dikelompokan menjadi dua yaitu data primer dan data skunder. Data-data yang telah terkumpul kemudian ditabulasi atau disusun berdasarkan sistematika atau tujuan penelitian.

## 4. Tahap Pengolahan Data dan Penyusunan Laporan

Sesudah semua data terkumpul dan ditabulasi, data-data tersebut diolah dan dianalisa kemudian disusun kedalam sebuah laporan. Berhasilnya suatu penelitian dan juga studi kelayakan terutama ditentukan pada kualitas laporan yang dibuat.

## 5. Tahap Evaluasi Proyek/Gagasan usaha

Tahap ini adalah membandingkan data-data yang telah terkumpul dengan persyaratan-persyaratan bagi berdiri dan berkembangnya proyek/gagasan usaha yang diusulkan. Evaluasi ini merupakan tehnik penghitungan untuk membandingkan data yang terkumpul dengan criteria yang digunakan.

Inti dari tahapan tersebut adalah segala macam aspek yang relevan dengan studi kelayakan dianalisa dengan membandingkan antara persyaratan atau

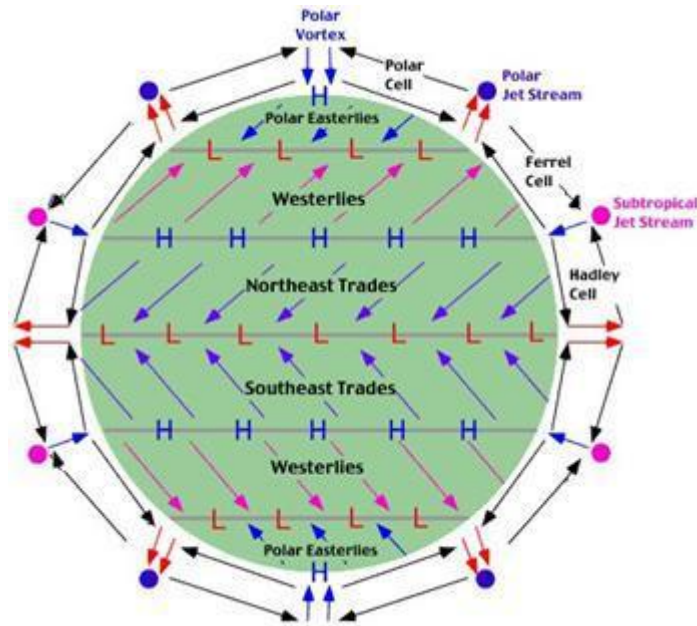
standar yang ideal dengan data yang terkumpul, dipaparkan permasalahannya dan dikemukakan saran-saran untuk pemecahannya.

## **2.1.2. Angin**

### **2.1.2.1. Definisi Angin**

Angin adalah udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan udara dengan arah aliran angin dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang bertekanan rendah atau dari daerah yang memiliki suhu / temperatur rendah ke wilayah bersuhu tinggi.

Angin timbul akibat sirkulasi di atmosfer yang dipengaruhi oleh aktivitas matahari dalam menyinari bumi yang berotasi. Dengan demikian, daerah khatulistiwa akan menerima energi radiasi matahari lebih banyak daripada di daerah kutub, atau dengan kata lain, udara di daerah khatulistiwa akan lebih tinggi dibandingkan dengan udara di daerah kutub. Perbedaan berat jenis dan tekanan udara inilah yang akan menimbulkan adanya pergerakan udara. Pergerakan udara inilah yang didefinisikan sebagai angin. Gambar 4 merupakan pola sirkulasi pergerakan udara akibat aktivitas matahari dalam menyinari bumi yang berotasi.



**Gambar 2.1. Pola sirkulasi udara akibat rotasi bumi**

Sumber : <http://Blog Konversi ITB, Energi Angin dan Potensinya>

Angin juga memiliki hubungan yang erat dengan sinar matahari karena daerah yang terkena banyak paparan sinar matahari akan memiliki suhu yang lebih tinggi serta tekanan udara yang lebih rendah dari daerah lain di sekitarnya sehingga menyebabkan terjadinya aliran udara. Angin juga dapat disebabkan oleh pergerakan benda sehingga mendorong udara di sekitarnya untuk bergerak ke tempat lain.

Angin buatan dapat dibuat dengan menggunakan berbagai alat mulai dari yang sederhana hingga yang rumit. Secara sederhana angin dapat kita ciptakan sendiri dengan menggunakan telapak tangan, kipas sate, koran, majalah, dan lain sebagainya dengan cara dikibaskan. Sedangkan secara rumit angin dapat kita buat dengan kipas angin listrik, pengering tangan, *hair dryer*, pompa ban, dan lain sebagainya. Secara alami kita bisa menggunakan mulut, hidung, lubang dubur, dan sebagainya untuk menciptakan angin.

### 2.1.2.2. Jenis-jenis Angin

Berdasarkan prinsip dari terjadinya, angin dapat dibedakan sebagai berikut:

#### 1) Angin Laut dan Angin Darat

Angin laut adalah angin yang timbul akibat adanya perbedaan suhu antara daratan dan lautan. Seperti yang kita ketahui bahwa sifat air dalam melepaskan panas dari radiasi sinar matahari lebih lambat daripada daratan, sehingga suhu di laut pada malam hari akan lebih tinggi dibandingkan dengan suhu di daratan. Semakin tinggi suhu, tekanan udara akan semakin rendah. Akibat adanya perbedaan suhu ini akan menyebabkan terjadinya perbedaan tekanan udara di atas daratan dan lautan. Hal inilah yang menyebabkan angin akan bertiup dari arah darat ke arah laut. Sebaliknya, pada siang hari dari pukul 09.00 sampai dengan pukul 16.00 angin akan berhembus dari laut ke darat akibat sifat air yang lebih lambat menyerap panas matahari.

#### 2) Angin Lembah

Angin lembah adalah angin yang bertiup dari arah lembah ke arah puncak gunung yang biasa terjadi pada siang hari. Prinsip terjadinya hampir sama dengan terjadinya angin darat dan angin laut yaitu akibat adanya perbedaan suhu antara lembah dan puncak gunung.

#### 3) Angin Musim

Angin musim dibedakan menjadi 2, yaitu angin musim barat dan angin musim timur. Angin Musim Barat/Angin Muson Barat adalah angin yang mengalir dari Benua Asia (musim dingin) ke Benua Australia (musim panas). Apabila angin

melewati tempat yang luas, seperti perairan dan samudra, maka angin ini akan mengandung curah hujan yang tinggi. Angin Musim Barat menyebabkan Indonesia mengalami musim hujan. Angin ini terjadi pada bulan Desember, Januari dan Februari, dan maksimal pada bulan Januari dengan kecepatan minimum 3 m/s.

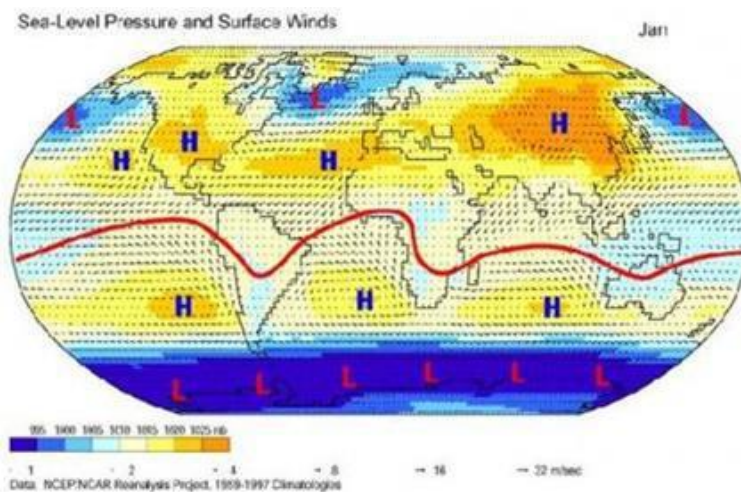
Angin Musim Timur/Angin Muson Timur adalah angin yang mengalir dari Benua Australia (musim dingin) ke Benua Asia (musim panas). Angin ini menyebabkan Indonesia mengalami musim kemarau, karena angin melewati celah-celah sempit dan berbagai gurun (Gibson, Australia Besar, dan Victoria). Musim kemarau di Indonesia terjadi pada bulan Juni, Juli dan Agustus, dan maksimal pada bulan Juli.

#### 4) Angin Permukaan

Kecepatan dan arah angin ini dipengaruhi oleh perbedaan yang diakibatkan oleh material permukaan Bumi dan ketinggiannya. Secara umum, suatu tempat dengan perbedaan tekanan udara yang tinggi akan memiliki potensi angin yang kuat. Ketinggian mengakibatkan pusat tekanan menjadi lebih intensif.

Selain perbedaan tekanan udara, material permukaan bumi juga mempengaruhi kuat lemahnya kekuatan angin karena adanya gaya gesek antara angin dan material permukaan bumi ini. Disamping itu, material permukaan bumi juga mempengaruhi kemampuannya dalam menyerap dan melepaskan panas yang diterima dari sinar matahari. Sebagai contoh, belahan Bumi utara didominasi oleh daratan, sedangkan selatan sebaliknya lebih didominasi oleh lautan. Hal ini saja sudah mengakibatkan angin di belahan Bumi utara dan

selatan menjadi tidak seragam. Gambar 5 menunjukkan tekanan udara dan arah angin bulanan pada permukaan Bumi dari tahun 1959-1997. Perbedaan tekanan terlihat dari perbedaan warna. Biru menyatakan tekanan rendah, sedangkan kuning hingga oranye menyatakan sebaliknya. Arah dan besar angin ditunjukkan dengan arah panah dan panjangnya.



**Gambar 2.2. Arah angin permukaan dan pusat tekanan atmosfer rata-rata pada bulan Januari, 1959-1997. Garis merah merupakan zona konvergen intertropik (ITCZ).**

Sumber : <https://indone5ia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>

## 5) Angin Topan

Angin topan adalah pusaran angin kencang dengan kecepatan angin 120 km/jam atau lebih yang sering terjadi di wilayah tropis di antara garis balik utara dan selatan. Angin topan disebabkan oleh perbedaan tekanan dalam suatu sistem cuaca. Di Indonesia dan daerah lainnya yang sangat berdekatan dengan khatulistiwa, jarang sekali dilewati oleh angin ini. Angin paling kencang yang terjadi di daerah tropis ini umumnya berpusar dengan radius ratusan kilometer



di sekitar daerah sistem tekanan rendah yang ekstrem dengan kecepatan sekitar 20 Km/jam.

### **2.1.2.3. Energi Angin**

#### **2.1.2.3.1. Energi Kinetik Angin sebagai Fungsi dari Kecepatan Angin**

Energi kinetik angin yang dapat masuk ke dalam area efektif turbin angin dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.1 berikut :

$$P = \frac{mv^2}{2} = \frac{(\rho Av)v^2}{2} = \frac{\rho Av^3}{2} \quad (2.1)$$

dimana pada persamaan tersebut dapat kita lihat bahwa energi angin (P ; Watt) bergantung terhadap faktor-faktor seperti aliran massa angin (m ; kg/s), kecepatan angin (v ; m/s), densitas udara ( $\rho$  ; 1,225 kg/m<sup>3</sup>), luas permukaan area efektif turbin (A ; m<sup>2</sup>). Di akhir persamaan, secara jelas dapat disimpulkan bahwa energi angin akan meningkat 8 kali lipat apabila kecepatan angin meningkat 2 kali lipatnya, atau dengan kata lain apabila kecepatan angin yang masuk ke dalam daerah efektif turbin memiliki perbedaan sebesar 10% maka energi kinetik angin akan meningkat sebesar 30%.

#### **2.1.2.3.2. Kecepatan Angin Berdasarkan Fungsi dari Ketinggiannya dari Permukaan Tanah**

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa kecepatan angin sangat dipengaruhi oleh ketinggian dari permukaan tanah. Semakin mendekati permukaan tanah, kecepatan angin semakin rendah karena adanya gaya gesek antara permukaan tanah dan angin. Untuk alasan ini, PLTB biasanya dibangun dengan menggunakan tower yang tinggi atau dipasang diatas bangunan. Berikut

adalah rumus bagaimana cara mengukur kecepatan angin berdasarkan ketinggiannya dan jenis permukaan tanah sekitarnya.

$$V = V_1(z/z_1)^{1/n}$$

$V$  : Kecepatan angin pada ketinggian  $z$

$V_1$  : Kecepatan angin pada ketinggian  $z_1$

$n$  : Nilai  $n$  dipengaruhi oleh jenis permukaan tanah

Tabel 2.1 menunjukkan besarnya nilai  $n$  sebagai faktor perbedaan jenis permukaan tanah yang mempengaruhi kecepatan angin.

**Tabel 2.1. Nilai  $n$  berdasarkan jenis permukaan tanah**

Jenis permukaan tanah	$n$	$1/n$
Padang rumput datar	7 ~ 10	0.10 ~ 0.14
Pesisir pantai	7 ~ 10	0.10 ~ 0.14
Sawah dan perkebunan	4 ~ 6	0.17 ~ 0.25
Daerah perkotaan	2 ~ 4	0.25 ~ 0.50

Sumber : <https://indone5ia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>

### 2.1.2.3.3. Potensi Energi Angin

Berdasarkan data dari GWEC, potensi sumber angin dunia diperkirakan sebesar 50,000 TWh/tahun. Total potensial ini dihitung pada daratan dengan kecepatan angin rata-rata diatas 5,1 m/s dan pada ketinggian 10 m. Data ini setelah direduksi sebesar 10% sebagai toleransi yang dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kepadatan penduduk, dan lain-lain.<sup>1</sup>

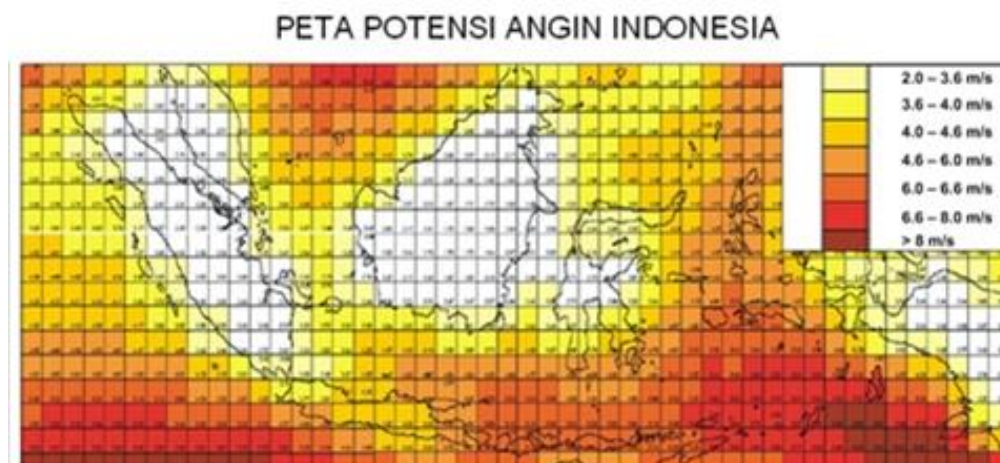
<sup>1</sup> <https://indone5ia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>, diakses pada tanggal 20 September 2015, pukul 19.40 WIB

**Tabel 2.2. Sebaran potensi energi angin. (TWh/tahun)**

Daerah	Grubb and Mayer [4]	Wijk and Coelingh [5]
Afrika	10600	-
Australia	3000	1638
Amerika Utara	14000	3762
America Latin	5400	-
Eropa Barat	500	520
Europa Timur	10600	-
Asia	4900	-
Perkiraan Total	50000	20000 (+area lain)

Sumber: <https://indone5ia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>

Berikut ini adalah peta potensi energi angin di Indonesia yang dapat digunakan sebagai referensi dalam mengembangkan pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia. Perbedaan kecepatan udara terlihat dari perbedaan warnanya.

**Gambar 2.3. Peta Potensi Angin Indonesia**

Sumber: <https://indone5ia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>

### **2.1.3. PLTB (Pembangkit Listrik Tenaga Bayu)**

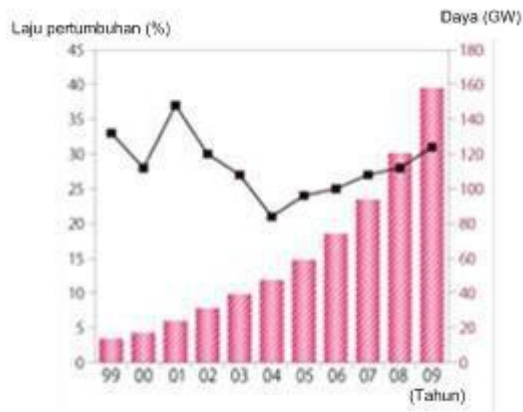
#### **2.1.3.1. Definisi PLTB**

Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau sering juga disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah salah satu pembangkit listrik energi terbarukan yang ramah lingkungan dan memiliki efisiensi kerja yang baik jika dibandingkan dengan pembangkit listrik energi terbarukan lainnya. Prinsip kerja PLTB adalah dengan memanfaatkan energi kinetik angin yang masuk ke dalam area efektif turbin untuk memutar baling-baling/kincir angin, kemudian energi putar ini diteruskan ke generator untuk membangkitkan energi listrik.

Berdasarkan data dari GWEC, jumlah PLTB yang ada di dunia saat ini adalah sebesar 157.900 Mega Watt (sampai dengan akhir tahun 2009), dan pembangkit jenis ini setiap tahunnya mengalami peningkatan dalam pembangunannya sebesar 20-30%. Teknologi PLTB saat ini dapat mengubah energi gerak angin menjadi energi listrik dengan efisiensi rata-rata sebesar 40%. Efisiensi 40% ini disebabkan karena akan selalu ada energi kinetik yang tersisa pada angin karena angin yang keluar dari turbin tidak mungkin mempunyai kecepatan sama dengan nol. Gambar 1 merupakan laju pertumbuhan dan daya elektrik total PLTB di dunia yang ada sampai saat ini.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> <https://indone5ia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>, diakses 20 September 2015, pukul 19.40 WIB



**Gambar 2.4.** Laju Pertumbuhan PLTB di Dunia

Sumber : <https://indone5ia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>

### 2.1.3.2. Sejarah Perkembangan PLTB

Pemanfaatan tenaga angin sebenarnya bukanlah hal yang sama sekali baru dalam sejarah peradaban. Sudah berabad-abad lamanya, manusia menggunakan angin sebagai tenaga penggerak kapal yang dipakai untuk mengarungi samudera dan menjelajah semesta. Konon, pada abad ke-17 SM, bangsa Babilonia kuno pun sudah menggunakan tenaga angin untuk sistem irigasi.

Turbin angin pertama sebagai pembangkit listrik berupa sebuah kincir angin tradisional dibuat oleh Poul La Cour di Denmark lebih dari 100 tahun yang lalu. Kemudian pada awal abad ke-20 mulai ada mesin eksperimen untuk turbin angin. Pengembangan lebih serius dilakukan pada saat terjadi krisis minyak di era 1970-an dimana banyak pemerintah di seluruh dunia mulai mengeluarkan dana untuk riset dan pengembangan sumber energi baru atau energi alternatif. Diawal 80-an terlihat pengembangan utama dilakukan di California dengan pembangunan ladang PLTB dengan ratusan turbin kecil. Sehingga sampai akhir dekade tersebut, sudah

dibangun 15.000 turbin angin dengan kapasitas pembangkit total sebesar 1.500 MW di daerah itu. Di era 80-an tersebut juga diikuti pemangkasan subsidi pemerintah untuk dana pengembangan turbin angin ini.<sup>3</sup>

Di Denmark, pemerintah tetap mendukung secara kontinu serta tetap mengawal pengembangan teknologi turbin angin ini. Akibatnya, teknologi dasar mereka tetap terpelihara dan tidak menghilang. Sehingga pada saat energi angin kembali menguat diawal 90-an, banyak perusahaan yang bergerak dibidang ini mampu merespon dengan cepat dan hasilnya mereka mampu mendominasi pasar hingga saat ini.

Sebagian besar ladang turbin angin yang terpasang masih di daratan. Hasil studi yang diadakan hingga akhir tahun 2002, kapasitas total terpasang untuk turbin angin darat berkisar 24 Giga Watt (GW) dan dipasang lebih dari 3 tahun terakhir. Lalu instalasi pertahunnya telah mencapai 4 GW. Saat ini laju rata-rata turbin terpasang secara internasional sudah mendekati 1 MW per unit. Dengan keberhasilan pengembangan dalam skala yang ekonomis tersebut, saat ini energi angin sudah mampu bersaing dengan pembangkit listrik lainnya seperti batubara maupun nuklir untuk daerah dimana banyak potensi angin.

Perkembangan teknologi tenaga angin di Indonesia dirintis oleh Ridho Hantaro, ST.MT pilot proyek sederhana bertemakan “renewable energy” hingga memenangkan “Brits Award for Poverty Alleviation 2006”. Proyek ini adalah pembuatan turbin angin pembangkit listrik di pulau Sapeken, Kabupaten Sumenep, Jawa Timur. Turbin angin berdiameter rotor 4 meter dengan 6 buah daun

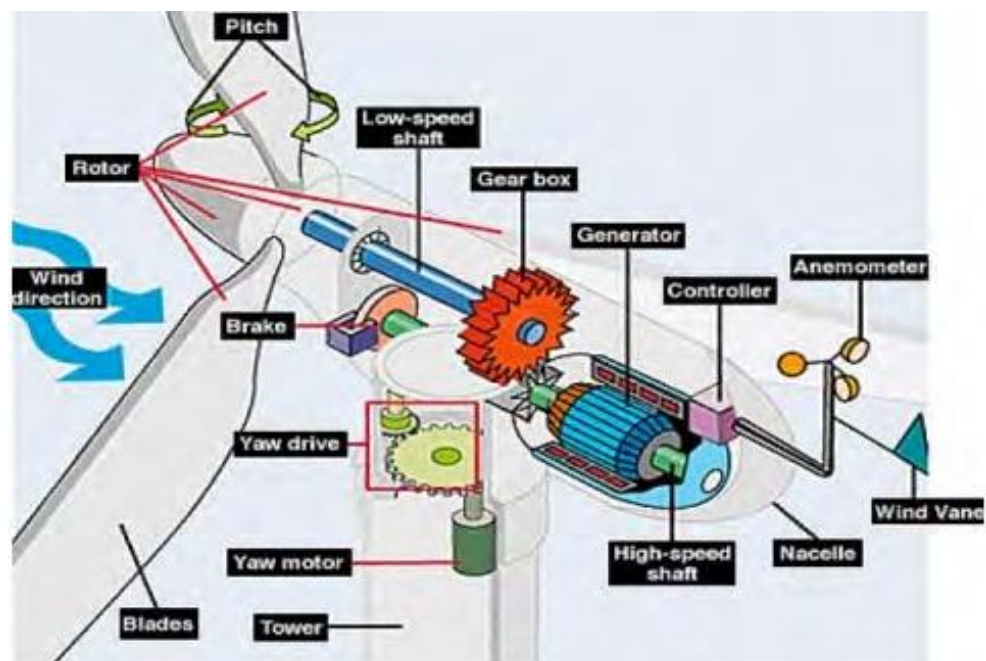
---

<sup>3</sup> <http://jendeladengabei.blogspot.co.id/2012/11/pembangkit-listrik-tenaga-bayu-angin.html>, diakses pada tanggal 20 September 2015, pukul 21.07 WIB

aluminium ini mampu menghasilkan daya hingga 1 KW dengan tiang penopang setinggi 8 meter.

### 2.1.3.3. Komponen-komponen pada PLTB

Berikut adalah komponen lengkap yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga bayu pada umumnya:



**Gambar 2.5. Komponen PLTB**

Sumber : <http://www.getsttpln.com/2014/03/komponen-pltb.html>

#### 1) Anemometer

Mengukur kecepatan angin dan mengirimkan data kecepatan angin ke pengontrol.

#### 2) *Blades*

Kebanyakan turbin baik dua atau tiga pisau. Angin bertiup di atas menyebabkan pisau pisau untuk mengangkat dan berputar.

### 3) *Brake*

Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah gearbox agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar diguaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak diatasi maka putaran ini dapat merusak generator. Dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih diantaranya *overheat*, rotor *breakdown*, kawat pada generator putus karena tidak dapat menahan arus yang cukup besar.

### 4) *Controller*

Pengontrol mesin mulai dengan kecepatan angin sekitar 8-16 mil per jam (mph) dan menutup mesin turbin sekitar 55 mph. tidak beroperasi pada kecepatan angin sekitar 55 mph di atas, karena dapat rusak karena angin yang kencang.

### 5) *Gear box*

*Gears* menghubungkan poros kecepatan tinggi di poros kecepatan rendah dan meningkatkan kecepatan sekitar 30-60 rotasi per menit (rpm), sekitar 1000-1800 rpm, kecepatan rotasi yang diperlukan oleh sebagian besar generator untuk menghasilkan listrik. gearbox adalah bagian mahal (dan berat) dari turbin angin dan insinyur generator mengeksplorasi *direct-drive* yang beroperasi pada kecepatan rotasi yang lebih rendah dan tidak perlu kotak gigi.

### 6) Generator

Biasanya standar induksi generator yang menghasilkan listrik dari 60 siklus listrik AC.



7) *High-speed shaft*

*Drive generator.*

8) *Low-speed shaft*

Mengubah poros rotor kecepatan rendah sekitar 30-60 rotasi per menit.

9) *Nacelle*

*Nacelle* berada di atas menara dan berisi *gear box*, poros kecepatan rendah dan tinggi, generator, kontrol, dan rem.

10) *Pitch*

*Blades* yang berbalik, atau nada, dari angin untuk mengontrol kecepatan rotor dan menjaga rotor berputar dalam angin yang terlalu tinggi atau terlalu rendah untuk menghasilkan listrik.

## 11) Rotor

Pisau dan terhubung bersama-sama disebut rotor

12) *Tower*

Menara yang terbuat dari baja tabung (yang ditampilkan di sini), beton atau kisi baja. Karena kecepatan angin meningkat dengan tinggi, menara tinggi memungkinkan turbin untuk menangkap lebih banyak energi dan menghasilkan listrik lebih banyak.

13) *Wind direction*

Ini adalah turbin pertama”yang disebut karena beroperasi melawan angin. turbin lainnya dirancang untuk menjalankan “melawan arah angin,” menghadap jauh dari angin.

14) *Wind vane*

Tindakan arah angin dan berkomunikasi dengan yaw drive untuk menggerakkan turbin dengan koneksi yang benar dengan angin

15) *Yaw drive*

*Yaw drive* yang digunakan untuk menjaga rotor menghadap ke arah angin sebagai perubahan arah angin.

16) *Yaw motor*

Kekuatan dari *drive yaw*.

17) Penyimpan energi (*Battery*)

Karena keterbatasan ketersediaan akan energi angin (tidak sepanjang hari angin akan selalu tersedia) maka ketersediaan listrik pun tidak menentu. Oleh karena itu digunakan alat penyimpan energi yang berfungsi sebagai back-up energi listrik. Ketika beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat atau ketika kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik tidak dapat terpenuhi. Oleh karena itu kita perlu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan ketika terjadi kelebihan daya pada saat turbin angin berputar kencang atau saat penggunaan daya pada masyarakat menurun.

#### **2.1.3.4. Jenis-jenis Turbin Angin**

Turbin angin pada prinsipnya dapat dibedakan atas dua jenis turbin berdasarkan arah putarannya. Turbin angin yang berputar pada poros horisontal disebut dengan turbin angin poros horisontal atau Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT), sementara yang berputar pada poros vertikal disebut dengan turbin angin poros vertikal atau Vertical Axis Wind Turbine (VAWT).



**Gambar 2.6. Jenis-jenis Kincir Angin**

Sumber : <https://indone5ia.wordpress.com/2011/05/21/prinsip-kerja-pembangkit-listrik-tenaga-angin-dan-perkembangannya-di-dunia/>

### 1) Turbin Angin Horizontal



**Gambar 2.7. Turbin Angin Horizontal**

Sumber : <http://www.satuenergi.com/2015/10/jenis-jenis-turbin-angin-serta.html>

Turbin angin horisontal adalah model umum yang sering kita lihat pada turbin angin. Desainnya mirip dengan kincir angin, memiliki blade yang mirip propeller dan berputar pada sumbu vertikal.

Turbin angin horisontal memiliki shaft rotor dan generator pada puncak tower dan harus diarahkan ke arah angin bertiup. Turbin-turbin kecil mengarah ke angin dengan menggunakan winde plane yang diletakkan di rotor, sementara untuk turbin yang lebih besar dilengkapi dengan sensor yang terhubung dengan motor servo yang mengarahkan blade sesuai dengan arah angin. Sebagian besar turbin yang besar memiliki gearbox yang merubah kecepatan putar rotor yang ditransfer ke generator menjadi lebih cepat.

Karena tower menghasilkan turbulensi di belakangnya maka turbin biasanya mengarah ke arah angin dari depan. Blade turbin dibuat kaku untuk mencegah terdorong ke tower oleh angin yang kencang. Disamping itu, blade di tempatkan pada jarak yang mencukupi didepan tower dan kadang melengkung kedepan.

Downwind turbine atau turbin dengan arah angin dari belakang juga dibuat, meskipun adanya masalah turbulensi, karena turbin ini tidak membutuhkan mekanisme yang mengharuskan searah dengan dengan angin. Disamping itu dalam keadaan angin kencang blade dibolehkan untuk melengkung yang mnurunkan area sapuan dan resistansi angin. Namun dikarenakan turbulensi dapat menyebabkan fatigue, dan keandalan sangat dibutuhkan maka sebagian besar turbin angin horisontal menggunakan jenis upwind.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> <http://www.satuenergi.com/2015/10/jenis-jenis-turbin-angin-serta.html>, diakses pada tanggal 2 November 2015, pukul 20.34 WIB

**Kelebihan Turbin Angin Horisontal :**

- Towernya yang tinggi memungkinkan untuk mendapatkan angin dengan kekuatan yang lebih besar. Pada beberapa area, setiap 10 meter ada kenaikan tambahan kekuatan angin 20% dan peningkatan daya 34%.
- Efisiensi lebih tinggi, karena blades selalu bergerak tegak lurus terhadap arah angin, menerima daya sepanjang putaran. Sebaliknya pada turbin vertikal, melibatkan gaya timbal balik yang membutuhkan permukaan airfoil untuk mundur melawan angin sebagian bagian dari siklus . Backtracking melawan angin menyebabkan efisiensi lebih rendah.

**Kekurangan Turbin Angin Horisontal :**

- Dibutuhkan konstruksi tower yang besar untuk mensupport beban blade, gear box dan generator.
- Komponen-komponen dari turbin angin horisontal (blade, gear box dan generator) harus diangkat ke posisinya pada saat pemasangan.
- Karena tinggi, maka turbin ini bisa terlihat pada jarak yang jauh, banyak penduduk lokal yang menolak adanya pemandangan ini.
- Membutuhkan kontrol ya sebagai mekanisme untuk mengarahkan blade ke arah angin
- Pada umumnya membutuhkan sistem pengereman atau peralatan yaw pada angin yang kencang untuk mencegah turbin mengalami kerusakan.

## 2) Turbin Angin Vertikal



**Gambar 2.8. Turbin Angin Vertikal**

Sumber : <http://www.satuenergi.com/2015/10/jenis-jenis-turbin-angin-serta.html>

Turbin angin vertikal memiliki shaft rotor vertikal. Kegunaan utama dari penempatan rotor ini adalah turbin angin tidak perlu diarahkan ke arah angin bertiup. Hal ini sangat berguna pada daerah dimana arah angin sangat variatif atau memiliki turbulensi.

Dengan sumbu vertikal, generator dan komponen primer lainnya dapat ditempatkan dekat dengan permukaan tanah, sehingga tower tidak perlu support dan hal ini menyebabkan maintenance lebih mudah. Kekurangan utama dari turbin angin vertikal adalah menciptakan dorongan saat berputar.

Sangat sulit untuk memasang turbin angin di tower, sehingga jenis tower ini biasanya di install dekat dengan permukaan. Kecepatan angin lebih lambat pada altitude yang rendah, sehingga energi angin yang tersedia lebih rendah.<sup>5</sup>

**Kelebihan Turbin Vertikal :**

- Tidak diperlukan mekanisme yaw
- Sebuah turbin angin bisa terletak dekat tanah, sehingga lebih mudah untuk menjaga bagian yang bergerak.
- turbin vertikal memiliki kecepatan startup angin rendah dibandingkan turbin horisontal
- turbin vertikal dapat dibangun di lokasi di mana struktur yang tinggi dilarang.

**Kekurangan Turbin Vertikal:**

- Kebanyakan turbin vertikal memiliki penurunan efisiensi dibanding turbin horisontal, terutama karena hambatan tambahan yang mereka miliki sebagai pisau mereka memutar ke angin. Versi yang mengurangi drag menghasilkan lebih banyak energi, terutama yang menyalurkan angin ke daerah kolektor.
- Memiliki rotor terletak dekat dengan tanah di mana kecepatan angin lebih rendah dan tidak mengambil keuntungan dari kecepatan angin tinggi di atas.
- Karena tidak umum digunakan terutama karena kerugian serius yang disebutkan di atas, mereka muncul baru untuk mereka yang tidak akrab

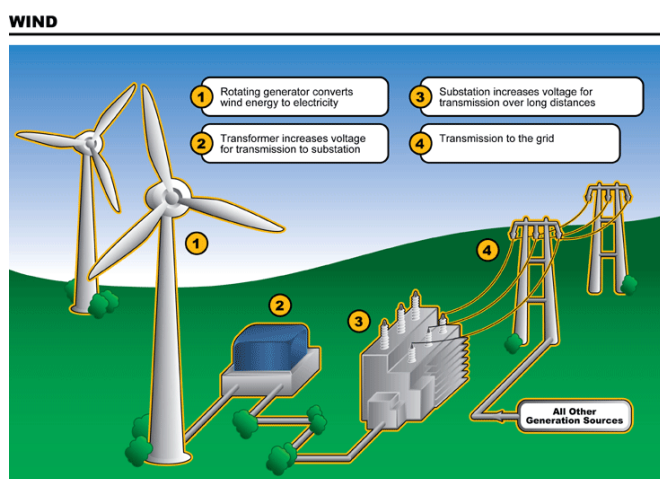
---

<sup>5</sup> <http://www.satuenergi.com/2015/10/jenis-jenis-turbin-angin-serta.html>, diakses pada tanggal 2 November 2015, pukul 20.34 WIB

dengan industri angin. Hal ini sering membuat mereka subjek klaim liar dan penipuan investasi selama 50 tahun terakhir.

### 2.1.3.5. Prinsip Kerja PLTB

Suatu pembangkit listrik dari energi angin merupakan hasil dari penggabungan dari beberapa turbin angin sehingga akhirnya dapat menghasilkan listrik. Cara kerja dari pembangkit listrik tenaga angin ini yaitu awalnya energi angin emeutar turbin angin. Turbin angin bekerja berkebalikan dengan kipas angin (bukan menggunakan listrik untuk menghasilkan listrik, namun menggunakan angin untuk menghasilkan listrik). Kemudian angin akan memutar sudu-sudu turbin, lalu diteruskan untuk memutar rotor pada generator letaknya di bagian belakang turbin angin. Generator mengubah energi putar rotor menjadi energi listrik dengan prinsip hukum faraday, yaitu bila terdapat penghantar didalam suatu medan magnet, maka pada kedua ujung penghantar tersebut akan dihasilkan beda potensial.



**Gambar 2.9. Proses Pembangkitan PLTB**

Sumber: <http://jendeladengabei.blogspot.co.id/2012/11/pembangkit-listrik-tenaga-bayu-angin.html>



Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya dihasilkan tegangan dan arus listrik. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik dan didistribusikan ke rumah-rumah, kantor, sekolah dan sebagainya.

Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (Alternating Current) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal. Energi listrik ini biasanya akan disimpan kedalam baterai sebelum dapat dimanfaatkan. Turbin untuk pemakaian umum berukuran 50-750 kilowatt. Sebuah turbin kecil, kapasitas 50 kilowatt, digunakan untuk perumahan, piringan parabola, atau pemompaan air.<sup>6</sup>

#### 2.1.3.6. Syarat angin untuk PLTB

Tidak semua jenis angin dapat digunakan untuk memutar turbin pembangkit listrik tenaga bayu / angin. Untuk itu berikut ini akan dijelaskan klasifikasi dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik.

**Tabel 2.3. Kondisi Angin**

<b>Tabel Kondisi Angin</b>			
<b>Kelas Angin</b>	<b>Kecepatan angin m/d</b>	<b>Kecepatan angin km/jam</b>	<b>Kecepatan angin knot/jam</b>
1	0.3 – 1.5	1 – 5.4	0.58 – 2.92
2	1.6 – 3.3	5.5 – 11.9	3.11 – 6.42

<sup>6</sup> <http://jendeladengabei.blogspot.co.id/2012/11/pembangkit-listrik-tenaga-bayu-angin.html>, diakses pada tanggal 20 September 2015, pukul 21.07 WIB

Tabel 2.3. Lanjutan

Tabel Kondisi Angin			
Kelas Angin	Kecepatan angin m/d	Kecepatan angin km/jam	Kecepatan angin knot/jam
3	3.4 – 5.4	12.0 – 19.5	6.61 – 10.5
4	5.5 – 7.9	19.6 – 28.5	10.7 – 15.4
5	8.0 – 10.7	28.6 – 38.5	15.6 – 20.8
6	10.8 – 13.8	38.6 – 49.7	21 – 26.8
7	13.9 – 17.1	49.8 – 61.5	27 – 33.3
8	17.2 – 20.7	61.6 – 74.5	33.5 – 40.3
9	20.8 – 24.4	74.6 – 87.9	40.5 – 47.5
10	24.5 – 28.4	88.0 – 102.3	47.7 – 55.3
11	28.5 – 32.6	102.4 – 117.0	55.4 – 63.4
12	>32.6	>118	63.4

Sumber : <http://tongkrongan22.blogspot.co.id/2015/01/bab-i-pendahuluan-1.html>

Tabel 2.4. Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter di Atas Permukaan Tanah

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan Tanah		
Kelas Angin	Kecepatan Angin m/d	Kondisi Alam di Daratan
1	0.00 - 0.02	_____
2	0.3 - 1.5	angin tenang, Asap lurus ke atas
3	1.6 - 3.3	asap bergerak mengikuti arah angin
4	3.4 - 5.4	wajah terasa ada angin, daun2 bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5.5 - 7.9	debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8.0 - 10.7	ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10.8 - 13.8	ranting pohon besar bergoyang, air plumpang berombak kecil

**Tabel 2.4. Lanjutan**

Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter di atas permukaan Tanah		
Kelas Angin	Kecepatan Angin m/d	Kondisi Alam di Daratan
8	13.9 - 17.1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17.2 - 20.7	dpt mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20.8 - 24.4	dpt mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24.5 - 28.4	dpt merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28.5 - 32.6	menimbulkan kerusakan parah
13	32.7 - 38.9	Tornado

Sumber: <http://tongkrongan22.blogspot.co.id/2015/01/bab-i-pendahuluan-1.html>

Angin kelas 3 adalah batas minimum dan angin kelas 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

#### 2.1.3.7. Keuntungan PLTB

- 1) Secara prinsip disebabkan karena sifatnya yang terbarukan

Eksplorasi sumber energi ini tidak akan membuat sumber daya angin berkurang seperti halnya penggunaan bahan bakar fosil.

- 2) Dapat berkontribusi dalam ketahanan energi dunia di masa depan

- 3) Merupakan sumber energi yang ramah lingkungan

Tidak mengakibatkan emisi gas buang atau polusi yang berarti ke lingkungan. Emisi karbon yang dihasilkan hanya sepeseratus jika dibandingkan dengan pembangkit listrik dengan batubara. Selain CO<sub>2</sub>, juga dihasilkan SO<sub>2</sub>, NO polutan atmosfer yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan pembangkit listrik yang menggunakan batubara ataupun gas.

### **2.1.3.8. Kelemahan PLTB**

#### **1) Dampak Visual**

Penggunaan ladang angin sebagai pembangkit listrik membutuhkan lahan yang luas dan tidak dapat disembunyikan. Penempatan ladang angin juga menjadi persoalan bagi penduduk setempat.

Selain mengganggu pandangan, pemasangan barisan pembangkit angin dapat mengurangi lahan pertanian serta pemukiman. Sehingga membuat pembangkitan tenaga angin di daratan menjadi terbatas.

#### **2) Derau Suara (derau frekuensi rendah)**

Putaran dari sudu-sudu turbin angin dengan frekuensi konstan lebih mengganggu dari pada suara angin pada ranting pohon. Selain derau dari sudu-sudu turbin, penggunaan gearbox serta generator dapat menyebabkan derau suara mekanis dan juga derau suara listrik.

Derau mekanik yang terjadi disebabkan oleh operasi mekanis elemen-elemen yang berada dalam nacelle atau rumah pembangkit listrik tenaga angin. Dalam keadaan tertentu turbin angin dapat juga menyebabkan interferensi elektromagnetik, mengganggu penerimaan sinyal televisi atau transmisi gelombang mikro untuk perkomunikasian.

#### **3) Masalah Ekologi**

Pengaruh ekologi yang terjadi dari penggunaan pembangkit tenaga angin adalah terhadap populasi burung dan kelelawar. Burung dan kelelawar dapat terluka atau bahkan mati akibat terbang melewati sudu-sudu yang sedang berputar.

Adanya pembangkit listrik tenaga angin ini dapat mengganggu migrasi populasi burung dan kelelawar. Pembangunan pembangkit angin pada lahan yang bertanah kurang bagus juga dapat menyebabkan rusaknya lahan di daerah tersebut.

#### **2.1.4. Jalan Tol**

##### **2.1.4.1. Definisi Jalan Tol**

Jalan Tol adalah jalan alternatif yang merupakan bagian dari sistem jaringan jalan nasional yang penggunaannya diwajibkan membayar tol. Jalan Tol memperlancar perjalanan antar satu wilayah dengan wilayah yang lainnya dengan memberikan keuntungan berupa penghematan waktu dibanding jalan non tol serta membantu menekan biaya operasional kendaraan.

Jalan Tol juga termasuk ke dalam jalan umum yang merupakan bagian sistem jaringan jalan dan sebagai jalan nasional yang penggunaannya diwajibkan membayar tol. Jalan tol sebagai bagian dari sistem jaringan jalan umum merupakan lintas alternatif. Namun dalam keadaan tertentu jalan tol dapat tidak merupakan lintas alternatif. (UU No. 38/ 2004 tentang Jalan Pasal 44).

Adapun manfaat jalan tol dalam keseharian sudah sangat dirasakan oleh masyarakat luas dan pelaku bisnis (pengusaha), karena jalan tol sebagai penghubung kelancaran distribusi perdagangan antar daerah dan provinsi, sehingga mempunyai dampak multiplier efek terhadap pertumbuhan dan perkembangan industri di sekitarnya dari skala kecil, menengah maupun yang paling besar seperti

industri pabrik, perkantoran, sekolah, rumah sakit dan retail terus tumbuh berkembang di sekitar koridor jalan tol.

Pembangunan jalan tol juga dilakukan untuk memperlancar lalu lintas di daerah yang telah berkembang, meningkatkan hasil guna dan daya guna pelayanan distribusi barang dan jasa untuk menunjang peningkatan pertumbuhan ekonomi, meringankan beban pemerintah melalui partisipasi pengguna jalan dan meningkatkan pemerataan hasil pembangunan dan keadilan. (UU 38/2004 Pasal 43 ayat 1).

Manfaat strategis lainnya dari pembangunan jalan tol yakni membuka lapangan kerja skala besar, meningkatkan penggunaan sumber daya dalam negeri seperti industri semen, baja dan jasa konstruksi, mendorong fungsi intermediasi bank, meningkatkan daya tarik investasi di Indonesia, dan meningkatkan kegiatan ekonomi di daerah yang dilalui jalan tol sebagai pendorong PDRB dan memperlancar kegiatan ekspor. Pembangunan jalan tol juga akan memacu kebangkitan sektor riil dengan terjadinya multiplier effect bagi perekonomian nasional.

#### **2.1.4.2. Tol Cijago**

Jalan Tol Cijago (kependekan dari jalan tol Cinere-Jagorawi) adalah jalan tol yang diresmikan tanggal 27 Januari 2012 lalu. Tol Cinere-Jagorawi atau yang lebih dikenal dengan nama tol Cijago ini merupakan bagian dari jalan tol Lingkar Luar Jakarta 2 (Jakarta Outer Ring Road 2) atau JORR 2. Tol Cijago ini panjangnya sekitar 14,6 km yang terdiri dari tiga seksi. Tiga seksi tol tersebut diantaranya:

- Seksi I (Jagorawi-Raya Bogor (Cisalak) – 3,70 km)

- Seksi II (Raya Bogor-Kukusan – 5,50 km)
- Seksi III (Kukusan-Cinere – 5,44 km)

Saat ini jalan tol Cinere-Jagorawi (Cijago) sudah beroperasi untuk seksi I, yaitu ruas tol dari tol Jagorawi hingga Cisalak (Jalan Raya Bogor) sepanjang 3,7 km. Dan pada saat ini, sedang berlangsung pembangunan untuk seksi kedua sepanjang 5,50 km yang membentang dari Cisalak (Raya Bogor) hingga Kukusan. Untuk saat ini, pembangunan masih berfokus pada area sekitar dekat Jalan Juanda, terutama dekat Perumahan Pesona Khayangan, jembatan Kali Ciliwung dan dekat pertigaan Margonda-Juanda. Adapun nantinya jalan tol ini akan dibuat underpass, sama seperti di titik pertemuan antara tol Cijago dengan jalan Raya Bogor.

## **2.2. Kerangka Berpikir**

Pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang memanfaatkan tenaga angin sebagai tenaga primer untuk membangkitkan listrik, merupakan pembangkit listrik yang cukup ramah lingkungan. Tenaga angin yang relatif mudah didapat dan merupakan sumber energi yang terbarukan, menjadi alasan utama PLTB terus dibangun dan dikembangkan di seluruh dunia. Angin pun sangat mudah tercipta hanya dengan gerakan benda-benda padat seperti misalnya ayunan pintu, kipas, bahkan mobil yang melaju kencang dapat menciptakan angin yang cukup besar ke arah samping mobil tersebut.

Jalan tol merupakan jalan yang memiliki daerah terbuka yang cukup luas sehingga terdapat banyak energi angin di sana. Selain itu, jalan tol merupakan jalan bebas hambatan di mana tidak terdapatnya lampu merah, halte, pasar dan hambatan-hambatan laju mobil lainnya. Sehingga mobil-mobil yang lewat relatif kencang.

Mobil yang melaju kencang tersebut pun dapat menghasilkan energi angin yang cukup besar.

Energi angin sangat ditentukan oleh kecepatan angin itu sendiri. Dapat dilihat pada rumus energi angin yaitu  $P \text{ angin} = \frac{mv^2}{2} = \frac{(\rho Av)v^2}{2} = \frac{\rho Av^3}{2}$  di mana  $V$  merupakan kecepatan angin. Setiap kenaikan kecepatan angin dapat membuat energi angin bertambah berkali-kali lipat karena pada rumus tersebut kecepatan angin dipangkatkan tiga. Selain kecepatan angin, luas penampang turbin juga berpengaruh terhadap daya angin yang dihasilkan turbin atau pun PLTB. Semakin besar luas penampang turbin, semakin besar juga energi yang dapat dihasilkan, karena banyaknya angin yang dapat masuk dalam area efektif turbin dan akan menghasilkan energi kinetik yang banyak pula (berbanding lurus). Sedangkan densitas angin atau pun masa jenis udara kering sudah memiliki angka tetap yaitu  $1,225 \text{ kg/m}^3$

Dari kajian-kajian teori yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya maka penulis harapkan dapat dirancangnya sebuah rancang bangun prototipe pembangkit tenaga listrik tenaga bayu pada pembatas jalan tol khususnya pada jalan tol Cijago. Di mana PLTB pada pembatas jalan tol tersebut menggunakan kincir angin dengan sumbu vertikal.

### **2.3. Hipotesis Penelitian**

Berdasarkan kerangka berfikir maka Hipotesis dalam penelitian ini adalah “diduga potensi energi angin pada tepi jalan tol cijago layak sebagai sumber energi primer untuk pembangkit listrik tenaga bayu”.