

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

Perkembangan teknologi yang pesat pada era globalisasi ini mengakibatkan persaingan yang ketat di bidang industri energi. Salah satu masalah terbesar di Indonesia adalah masalah energi. Di Indonesia terdapat beberapa sumber energi terbarukan seperti energi air, matahari, angin dan lain-lain. Khususnya energi angin yang masih sedikit pemanfaatannya di Indonesia ini. Indonesia sebagai Negara kepulauan memiliki wilayah pesisir yang potensial untuk pengembangan listrik tenaga angin (PLTA). Karena sifatnya yang terbarukan (renewable) sudah jelas akan memberikan keuntungan karena angin tidak akan habis digunakan tidak seperti pada penggunaan bahan bakar fosil. Tenaga angin juga merupakan sumber energi yang ramah lingkungan, dimana penggunaannya tidak mengakibatkan emisi gas buang atau polusi yang berarti ke lingkungan. Salah satu pemanfaatan energi angin adalah menggunakan turbin angin. Turbin angin mampu mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan generator.

Secara umum Turbin angin terbagi menjadi dua yaitu turbin angin savonius dan Darrieus. Turbin angin Savonius adalah salah satu jenis kincir angin dengan axis horizontal yang mampu mengubah energi angin Horizontal menjadi energi kinetik rotasi. Turbin angin Darrieus adalah satu jenis turbin angin sumbu vertikal yang di gunakan untuk menghasilkan listrik dari energi angin. Turbin

terdiri dari bilah aerofil melengkung yang dipasang pada poros atau kerangka yang berputar.

Energi angin yang terdapat di pantai matematik Deli serdang, Sumatera utara dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif untuk menghasilkan energi listrik. Melalui pemanfaatan energi angin tersebut pemakaian bahan bakar fosil (batu bara, gas dan minyak bumi) yang selama ini berlebihan dapat dikurangi dan dapat menghemat biaya mengingat begitu mahalnya harga bahan bakar tersebut.

Di pantai matematik Deli serdang, Medan, Sumatera Utara termasuk lokasi yang banyak menghasilkan angin dan masih ada energi yang terbuang dari angin tersebut Turbin angin yang sudah banyak digunakan adalah turbin angin sumbu vertikal yang memerlukan angin berkecepatan tinggi. Namun di Indonesia khususnya di pantai matematik Deli serdang, Medan, Sumatera Utara masih sangat rendah dan selalu berubah ubah. Pada turbin angin sumbu vertikal pemanfaatannya harus diarahkan sesuai dengan arah angin paling yang tinggi kecepatannya. Berbeda dengan turbin angin sumbu vertical jenis savonius yang mampu menerima angin dari segala arah dan memiliki torsi awal yang besar pada kecepatan angin yang rendah. Sehingga dapat digunakan di daerah dengan kecepatan angin yang rendah dan arah angin yang berubah ubah seperti dipantai matematik Deli serdang, Medan, Sumatera Utara. Turbin angin sumbu vertical lainnya yaitu turbin angin jenis darrieus yang juga mampu menerima angin dari segala arah dan mampu berputar pada kecepatan rendah. Kelemahan turbin angin darrieus adalah tidak memiliki system *self starti*.

Namun, agar dapat dihasilkan energi yang maksimal, maka energi angin yang dihasilkan harus dapat dikonversikan secara maksimal untuk menghasilkan energi listrik. Salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi energi yang dibangkitkan adalah jumlah bilah angin. Oleh sebab itu pengaruh jumlah blade terhadap putaran turbin, mempengaruhi kecepatan angin yang bisa dimanfaatkan untuk dapat memutar turbin, dan bagaimana proses pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik. Untuk memenuhi beberapa faktor oleh sebab itu maka penulis akan melakukan penelitian dan pembuatan turbin angin dengan judul Pengujian Turbin Angin Darrieus Di Pantai Matematik Deli Serdang Dengan Variasi Jumlah Blade. Sehingga dapat menjadi perhitungan dalam penerapan dilapangan.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Berdasarkan uraian diatas, dapat diidentifikasi permasalahan yaitu berupa upaya untuk meningkatkan daya yang dihasilkan oleh generator. Secara spesifik permasalahannya dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana mengetahui kinerja blade terhadap putaran turbin angin darrieus?
2. Bagaimana model variasi jumlah blade pada turbin angin darrieus?

## **1.3. Batasan Masalah**

Untuk menghindari penyimpangan dan perluasan pembahasan maka berikan batasan batasan masalah sebagai berikut:

1. Turbin angin yang di gunakan adalah turbin angin darrieus
2. Variasi jumlah blade dibuat sebanyak tiga variasi jumlah yaitu 2,3 dan 4

#### **1.4. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini dapat memberikan reverensi kepada masyarakat secara umum dan khususnya kepada perancang turbin angin darrieus dengan rumitnya perhitungan dari konstruksi turbin tersebut, mereka dapat memilih konstruksi yang tepat. Karena pada ukuran tertentu khususnya jumlah blade dapat mempengaruhi hasil pancaran angin yang berhembus yang berakibat pada hasil pada putaran dan daya turbin angin darrieus tersebut. sehingga perancang dapat memprediksi bila menggunakan ukuran tertentu bisa mengeluarkan hasil yang maksimal dan sebagai acuan penelitian.

#### **1.5. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui pengaruh jumlah blade dalam putaran dan daya pada turbin angin darrieus.
2. Untuk mengetahui jumlah blade yang paling baik
3. Untuk mengetahui efisiensi turbin tertinggi dan terendah

## BAB 2

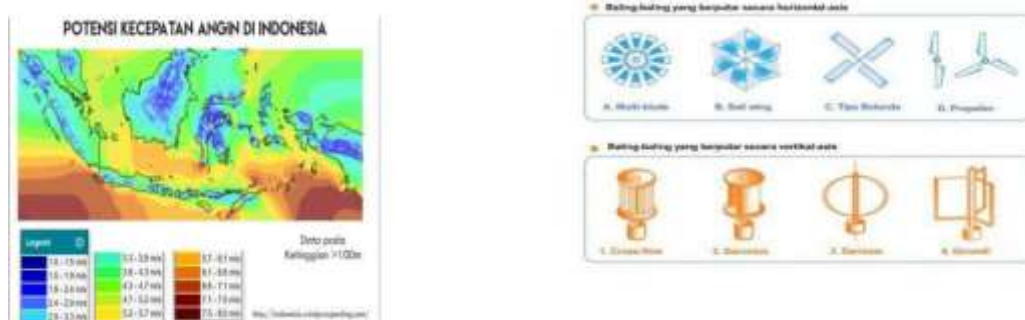
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Landasan Teori

##### 2.1.1. Turbin Angin

Secara sederhana energi potensial yang terdapat pada angin dapat memutar blade-blade yang terdapat pada kincir angin, dimana blade-blade ini terhubung dengan poros dan memutar poros yang telah terhubung dengan generator dan menimbulkan arus listrik. Kincir yang besar dapat digabungkan secara bersama-sama sebagai energi tenaga angin, dimana akan memberikan daya ke dalam sistem transmisi kelistrikan.

Model sederhana dari turbin angin mengambil dasar teori dari momentum, angin dengan kecepatan tertentu menabrak rotor yang memiliki performa sayap atau propeller. Dalam model sederhana, dimana memungkinkan Newtonian mechanics digunakan, aliran diasumsikan steady dan mendatar, udara diasumsikan incompressibel dan inviscid, dan aliran downstream (aliran setelah melalui rotor) diasumsikan konstan di sekeliling bagian streamtube dengan tidak ada diskontinuitas tekanan di seberang perbatasan streamtube.

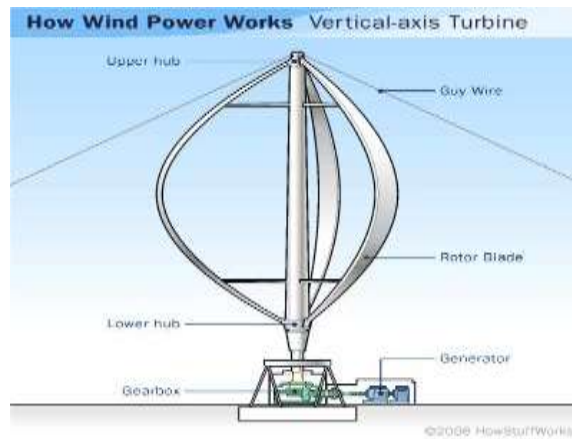


Gambar 2.1. Potensi Kecepatan Angin Di Indonesia Dan Jenis Jenis Turbin Angin

Pada tahun 1931” (Abdul Kadir, 2005). Turbin tersebut diciptakan kembali oleh insinyur di Dewan Pengembangan National Kanada pada awal tahun 1970. Laboratorium Sandia membangun *Darrieus* dengan diameter 5 m pada tahun 1974 dan sejak itu pengembangan turbin angin tipe *Darrieus* terus dilakukan. Kebanyakan turbin angin yang didesain untuk memproduksi listrik memiliki 2 atau tiga sudu yang berputar secara horizontal. Sudu yang dibuat ini cenderung mahal dan termasuk alat berteknologi tinggi. Masalah inilah yang membuat para peneliti mencari solusi untuk alat yang lebih simple dan murah.

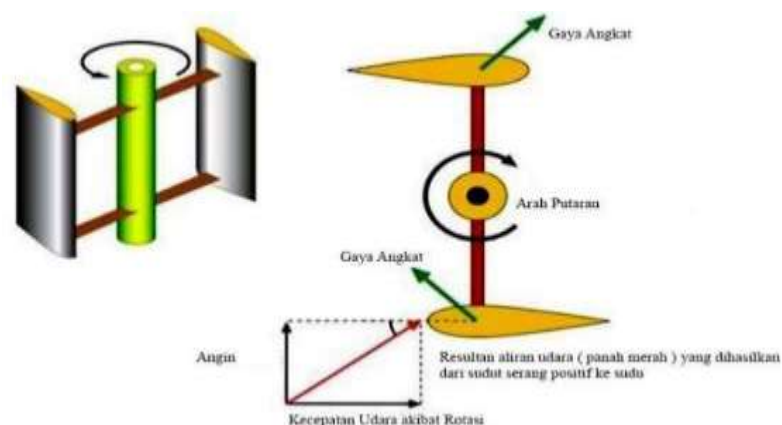
Prinsip kerjanya berdasarkan pada fakta bahwa kecepatan sudu adalah kelipatan dari kecepatan angin, sehingga besarnya angin yang dapat ditangkap oleh sudu turbin tergantung pada variasi sudut sudu. Bila dilihat dari perspektif sudu, gerakan rotasi dari sudu yang diakibatkan oleh angin merupakan hasil dari daya kinetik angin yang menabrak sudu dengan daya mekanik yang dimiliki turbin. Jika sudut serang dari angin pada sudu lebih besar dari nol, maka akan timbul gaya angkat yang dapat mendorong sudu turbin untuk bergerak. Sudut serang yang bervariasi antara -20 sampai +20 derajat, tidak boleh melebihi 20 derajat karena pada sudut lebih tinggi aliran sepanjang sudu tidak laminar lagi, yang merupakan kondisi yang diperlukan untuk menimbulkan gaya angkat, tapi menjadi turbulen yang menyebabkan putaran sudu terhambat. Sudut serangan antara nol dan 20 derajat dapat menghasilkan putaran yang tinggi pada sudu. “Turbin *Darrieus* dapat menangkap angin dari segala penjuru, turbin ini tidak memerlukan sudu pengatur arah angin. Dikemudian hari turbin *Darrieus* mungkin dapat mengatur dirinya sendiri dengan sudu-sudu yang dapat bergerak turun naik

sepanjang poros, mengubah bentuknya sesuai dengan kecepatan angin” (Mike Cross, 1987).



Gambar 2.2. Turbin Angin Darrieus Sumbu Vertikal

Turbin *Darrieus* memiliki beberapa kekurangan seperti getaran yang kekerasan sehingga dapat menyebabkan kerusakan sudu, dan tingkat kebisingan yang tinggi dan efisiensi yang relatif rendah. Dari gambar dapat dilihat prinsip kerja dari turbin *Darrieus* bahwa resultan dari kecepatan angin dan kecepatan udara karena rotasi membentuk sudut positif dari sudut serang gaya angkat padasudu. Prinsip kerja turbin angin tipe *Darrieus* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Prinsip Kerja Turbin Darrieus

Turbin angin *Darrieus* memiliki torsi rotor yang relatif rendah tetapi putarannya lebih tinggi dibanding dengan turbin angin *Savonius* sehingga lebih diutamakan untuk menghasilkan energi listrik. Namun turbin ini membutuhkan energi awal yang lebih besar untuk mulai berputar.

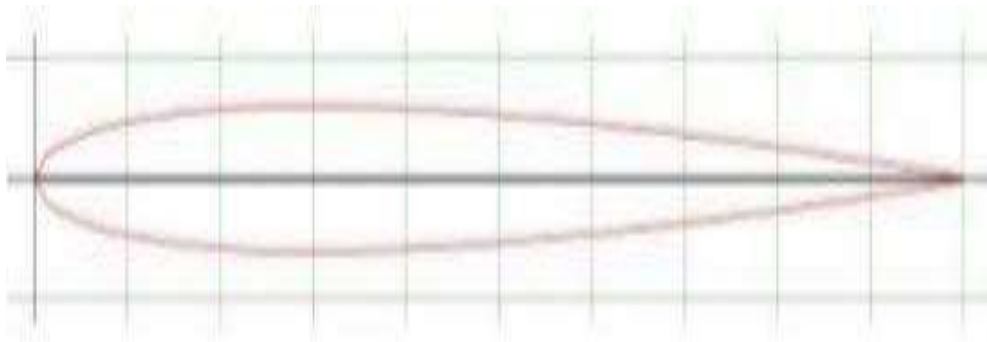
Turbin angin *Darrieus* biasanya akan mulai berputar pada kecepatan angin 2,5 m/detik dan dapat menghasilkan daya pada kecepatan angin 3 m/detik. Turbin angin *Darrieus* memiliki sudu dengan penampang berbentuk *airfoil*. Efisiensi maksimum turbin angin tipe *Darrieus-H* untuk saat ini masih berada pada 42 %, sedangkan turbin angin tipe horizontal mempunyai efisiensi maksimum sebesar 50 %. Hal ini mengakibatkan turbin angin tipe *Darrieus* jarang dipakai untuk pembangkit listrik dengan kapasitas yang besar.

## **2.2. Airfoil NACA**

*NACA Airfoil* adalah bentuk *airfoil* sayap pesawat udara yang dikembangkan oleh *National Advisory Committee for Aeronautics (NACA)*. Sampai sekitar perang dunia ke II, *Airfoil* banyak digunakan adalah hasil riset Gottingen. Selama periode ini banyak pengujian *airfoil* dilakukan berbagai negara, namun hasil riset *NACA* adalah yang paling terkemuka. Pengujian yang dilakukan *NACA* lebih sistematis dengan membagi pengaruh efek kelengkungan dan distribusi ketebalan serta pengujiannya dilakukan pada bilangan *Renault* yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lain. Berikut ini adalah identifikasi angka seri dari *NACA* “empat angka” tersebut:



1. Angka pertama adalah maksimum camber dalam perseratus *chord*.
2. Angka kedua adalah Posisi maksimum camber pada *chord line* dalam sepersepuluh *chord* dari *leading edge*.
3. Dua angka terakhir dalam maksimum
4. ketebalan dalam seperseratus *chord* Misalnya untuk *airfoil* dengan NACA 0006 (seri empat angka) memiliki camber maksimum 0c terletak di 0c dari *leading edge*, dan maksimum ketebalan 0.06c. Dalam praktek, umumnya angka- angka ini dinyatakan dalam persen tali busur, yaitu: camber 0% di 0%cdengan tebal 6%. Untuk *airfoil* NACA 0006 dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Naca 006

### 2.3. Teori Momentum *Elementer Betz*

Teori momentum *elementer Betz* sederhana berdasarkan pemodelan aliran dua dimensi angin yang mengenai rotor menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran udara berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor dipandang pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan sebagian energi kinetik angin diserap oleh rotor turbin angin. Pada kenyataannya, putaran rotor menghasilkan perubahan

kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Walaupun teori *elementer Betz* telah mengalami penyederhanaan, namun teori ini cukup baik untuk menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversi menjadi bentuk energi lainnya. Dengan menganggap bahwa kecepatan udara yang melalui penampang A adalah sebesar  $v$ , maka aliran volume udara yang melalui penampang rotor pada setiap satuan waktu dapat ditentukan dengan persamaan berikut .

(Sumber : Rancang Bangun Turbin .Anis, Ilham, Muhammad, Sahid, Supriyo Jurnal Teknik Energi Vol 15 .2019; 102-114)

$$V = v \cdot A \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

$V$  = laju volume udara ( $m^3/s$ )

$v$  = kecepatan angin (m/detik)

$A$  = luas area sapuan rotor ( $m^2$ )

Dengan demikian, laju aliran massa dapat dirumuskan dengan persamaan

$$m = \rho \cdot V \cdot A \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana :

$\rho$  = massa jenis udara ( $kg/m^3$ )

Persamaan yang menyatakan energi kinetik yang melalui penampang A pada setiap satuan waktu dapat dinyatakan sebagai daya yang melalui penampang A adalah:

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

dimana :

P = daya kinetik (Watt)

Energi kinetik dapat diambil dari angin dengan mengurangi kecepatannya. Artinya kecepatan udara di belakang rotor akan lebih rendah daripada kecepatan udara di depan rotor. Gambar 2.2 menunjukkan kondisi aliran udara akibat ekstraksi energi mekanik aliran bebas dimana kecepatan angin setelah mengalami ekstraksi ( $V_2$ ) lebih rendah daripada kecepatan angin sebelum mengalami ekstraksi ( $V_1$ ). Energi mekanik yang diambil dari angin setiap satuan waktu didasarkan pada perubahan kecepatannya dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^3 \cdot A_1 - \frac{1}{2} \rho \cdot v_2^3 \cdot A_2$$
$$= \frac{1}{2} \cdot \rho (v_1^3 \cdot A_1 - v_2^3 \cdot A_2) \dots \dots \dots (2.4)$$

dimana:

P = daya yang diekstraksi (Watt)

$\rho$  = massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$A_1$  = luas penampang aliran udara sebelum melalui rotor ( $\text{m}^2$ )

$A_2$  = luas penampang aliran udara setelah melalui rotor ( $\text{m}^2$ )

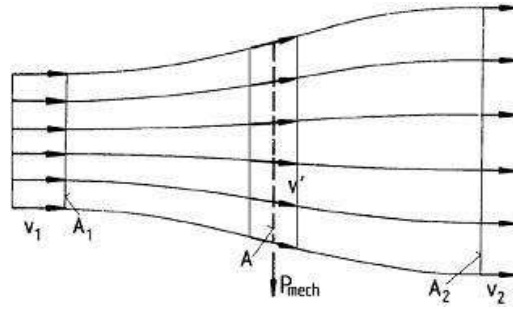
$v_1$  = kecepatan aliran udara sebelum melewati rotor (m/detik)

$v_2$  = kecepatan aliran udara setelah melewati rotor (m/detik)

Dengan asumsi massa jenis tidak mengalami perubahan maka sesuai hukum kontinuitas sebagai berikut :

$$\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 \dots \dots \dots (2.5)$$

Kondisi aliran udara akibat ekstraksi energi mekanik aliran bebas dapat dilihat pada Gambar di bawah.



Gambar 2.5. Model Aliran Dari Teori Momentum Beltz

Dari persamaan tersebut disimpulkan bahwa daya terbesar yang diambil dari angin adalah jika  $v_2$  bernilai nol, yaitu angin berhenti setelah melalui rotor. Namun hal ini tidak dapat terjadi karena tidak membantu hukum komunitas.

Energi angin yang diubah akan semakin besar jika  $v_2$  semakin kecil, atau dengan kata lain rasio  $v_1/v_2$  harus semakin besar. Persamaan lainnya yang diperlukan untuk mencari besarnya daya yang dapat diambil adalah persamaan momentum. (John 2012).

$$F = m (v_1 - v_2) \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana:

$F$  = gaya (N)

$\dot{m}$  = laju aliran massa udara (kg/s)

Sesuai dengan hukum ke-2 *Newton* bahwa gaya aksi akan sama dengan gaya reaksi, gaya yang diberikan udara kepada rotor akan sama dengan gaya

hambat oleh rotor yang menekan udara ke arah yang berlawanan dengan arah gerak udara. Daya yang diperlukan untuk menghambat aliran udara adalah:(jhon,2012)

$$P = F \cdot v^1 = m(v_1 - v_2) \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana :

$v'$  = kecepatan aliran udara pada rotor (m/detik)

Kedua persamaan diatas menunjukkan hubungan

$$\frac{1}{2}m(v_1 - v_2) = m(v_1 - v_2)v' \dots\dots\dots(2.8)$$

Sehingga,

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \dots\dots\dots(2.9)$$

Maka kecepatan aliran udara ketika melalui rotor adalah

$$v^1 = \frac{v_1 + v_2}{2} \dots\dots\dots(2.10)$$

Laju aliran massa menjadi

$$m = \rho \cdot A \cdot v' = \frac{1}{2} \rho \cdot A(v_1 + v_2) \dots\dots\dots(2.11)$$

Sehingga daya mekanik output dapat ditulis :

$$\rho = \frac{1}{2} \rho \cdot A(v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \dots\dots\dots(2.12)$$

Supaya dapat dijadikan referensi untuk daya output tersebut, maka dapat dibandingkan dengan daya aliran bebas yang mengalir dengan luas sapuan yang sama tanpa ada ekstraksi.(jhon, 2012).

$$\eta P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot v_1^3 \dots\dots\dots(2.13)$$

## 2.4. TSR (*Tip Speed Ratio*)

*Tip Speed Ratio* (Rasio kecepatan ujung) adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas. Untuk kecepatan angin nominal yang tertentu, *tip speed ratio* akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor.

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{(\pi \cdot D \cdot n)/60}{v} \dots\dots\dots(2.14)$$

## 2.5. Efisiensi Sistem

Perbandingan antara daya keluaran rotor terhadap daya input yang melalui penampang rotor disebut efisiensi sistem ( $\eta_{\text{sistem}}$ ). Dirumuskan dengan :(jhon,2012)

$$\eta_{\text{sistem}} = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} = \frac{P_{\text{generator}}}{P_{\text{angin}}} \dots\dots\dots(2.15)$$

## 2.6. Generator AC

Generator Arus Bolak-balik sering disebut juga sebagai alternator atau generator AC (*alternating current*). Generator arus bolak-balik dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

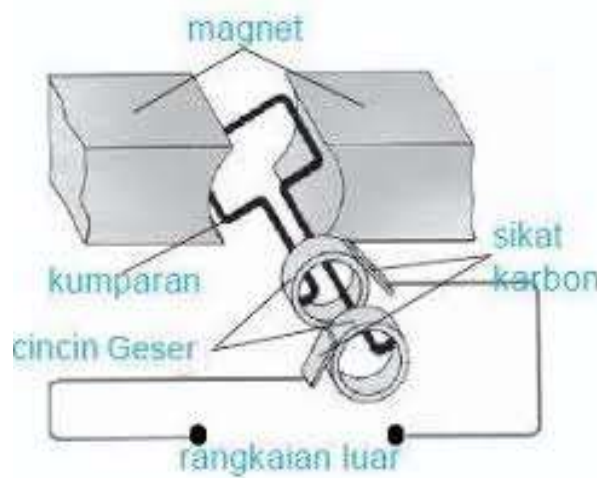
- a. Generator arus bolak-balik 1 fasa.
- b. Generator arus bolak-balik 3 fasa.

## 2.7. Prinsip Kerja Generator

Prinsip dasar generator arus bolak-balik menggunakan hukum *Faraday* yang menyatakan jika sebatang penghantar berada pada medan magnet yang berubah-

ubah, maka pada penghantar tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik. Besar tegangan generator bergantung pada :

1. Kecepatan putaran (N).
2. Jumlah kawat pada kumparan yang memotong fluk (Z).
3. Banyaknya fluk magnet yang dibangkitkan oleh medan magnet ( $\Phi$ ).



Gambar 2.6. Prinsip Kerja Generator

Jika kumparan kawat dihubungkan dengan rangkaian listrik tertutup, maka akan timbul pula arus listrik yang mengalir pada rangkaian. (Jhon, 2012)

$$E = c.n. \Phi \dots \dots \dots (2.16)$$

$$E = B.l. v \sin \dots \dots \dots (2.17)$$

dimana:

c = konstanta

n = kecepatan (rad/s)

$\Phi$  = fluks (Weber)

E = ggl induksi (Volt)

$B$  = induksi magnet (T)

$l$  = panjang kawat (m)

$v$  = kecepatan potong medan (rad/s)

## 2.8. Sudu (*Blade*)

Sudu (*Blade*) beberapa penelitian telah dilakukan untuk membuat berbagai macam bentuk sudu yang sesuai untuk turbin angin. Diantara beberapa bentuk sudu yang telah dibuat untuk turbin angin sumbu horizontal adalah multi blade, sailswing, tipe Belanda dan propeller. Sedangkan pada turbin angin sumbu vertikal adalah *cross-flow*, savonius, darrieus dan giromill.

Desain sudu turbin juga tidak terlepas dari rancangan sistem aerodinamis sudu turbin yang ditentukan dengan tipe airfoil yang digunakan. Airfoil merupakan bagian terpenting pada bagian sudu turbin untuk menerima aliran angin yang melintasi permukaan sudu. Menurut John, tipe airfoil yang digunakan pada saat ini memiliki dua tipe yaitu NACA 4412 dan NACA 23012. Berdasarkan pengujian airfoil yang dilakukan oleh John, dapat diketahui bahwa airfoil tipe NACA 4412 memiliki koefisien daya dan efisiensi sudu turbin yang lebih baik daripada airfoil tipe NACA 23012, Berdasarkan pengujian airfoil yang dilakukan oleh John, dapat diketahui bahwa airfoil tipe NACA 4412 memiliki koefisien daya dan efisiensi sudu turbin yang lebih baik daripada airfoil tipe NACA 23012, sehingga pada penelitian ini airfoil tipe NACA 4412 dalam merancang sudu turbin yang terpilih. Penentuan tipe aliran yang mengalir pada



airfoil tipe NACA 4412 menggunakan persamaan bilangan Reynolds yang ditunjukkan pada Persamaan 5. (John, 2012).

$$Re = \frac{\rho v c}{\mu}$$

Nilai sudut koefisien lift force dan drag force atau yang biasa dikenal dengan sudut serang (angle of attack) dari airfoil NACA 4412 ( $\alpha$ ) adalah sebesar 8.50 (John,2012). Nilai koefisien tersebut dapat digunakan untuk menentukan sudut pitch ( $\beta$ ) sebagai sudut sudu turbin yang digunakan untuk menerima aliran angin yang melewati area permukaan sudu berdasarkan Persamaan 6. (John,2012).

$$\beta = \phi - \alpha$$

Analisis distribusi gaya yang terjadi pada sudu turbin dilakukan berdasarkan perhitungan rancangan sudu turbin. Analisis distribusi gaya terfokus kepada analisis gaya dorong (drag force) [Fd] dan gaya angkat (lift force) [FL]. Distribusi kedua gaya ini dipengaruhi oleh koefisien gaya dorong (CD) sebesar 0.02333 dan gaya angkat (CL) sebesar 1.3086 di mana kedua koefisien tersebut tergantung dari nilai sudut ( $\alpha$ ) airfoil tipe NACA 4412 (John, 2012), massa jenis udara ( $\rho$ ), luas penampang sudu turbin yang dirancang dari software desain SolidWork (A), dan kecepatan angin (v). Kedua gaya tersebut dapat diketahui dengan Persamaan 7 dan 8 (John,2012).

$$F_{D=\frac{1}{2}} C_D \rho V^2 A$$

$$F_{L=\frac{1}{2}} C_L \rho V^2 A$$

Setelah mengetahui besaran gaya angkat dan gaya dorong, maka dilakukan perhitungan gaya aksial ( $F_a$ ) dan gaya tangensial ( $F_t$ ) pada sudu turbin dengan pengaruh sudut apparent wind atau sudut arah angin masuk ke dalam sudu turbin ( $\varphi$ ) yang dapat dihitung dengan Persamaan 9 (John, 2012 ) berdasarkan jari-jari rotor ( $r$ ) dan TSR ( $\lambda$ ) yang kemudian dilanjutkan dengan Persamaan 10 dan 11. (John, 2012 ).

$$F_L = F_L \cos \varphi + F_{D+} \sin \varphi$$

$$F_a = F_L \sin \varphi - F_D \cos \varphi$$

Setelah melakukan desain sudu turbin, maka selanjutnya dapat ditentukan kondisi daya teoritis pada turbin. Daya teoritis pada perancangan turbin angin tipe Darrieus memperhitungkan laju aliran massa, daya mekanik rotor turbin, dan daya turbin yang dibangkitkan oleh hembusan angin. Perhitungan laju aliran massa udara ( $\dot{m}$ ), dipengaruhi oleh luas penampang ( $A$ ) dari sudu yang dirancang. Perhitungan laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) menggunakan Persamaan 12. (Tong, 2010).

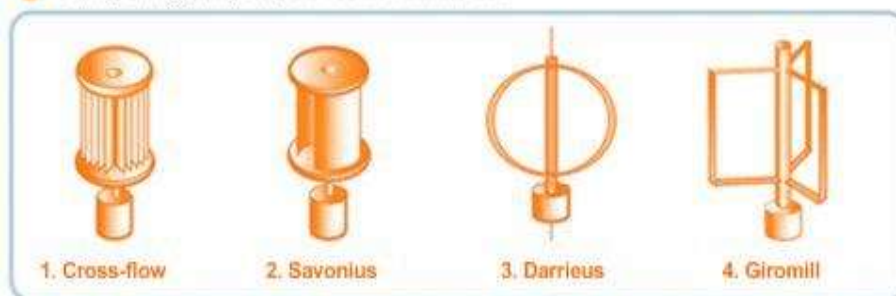
$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$$

Daya mekanik turbin terletak pada bagian rotor turbin. Daya mekanik pada rotor turbin tergantung dari putaran rotor turbin ( $n$ ) dan gaya torsi ( $T$ ) yang terdapat pada sistem rotor turbin, dimana gaya torsi tersebut dipengaruhi oleh faktor antara lain laju aliran massa udara ( $\dot{m}$ ), kecepatan angin yang masuk ke dalam rotor ( $v$ ), dan jari-jari rotor ( $r$ ). Analisis gaya torsi ( $T$ ) dan daya mekanik ( $P_m$ ) rotor turbin dapat dihitung dengan Persamaan 13 dan 14 (Tong, 2010).

■ Baling-baling yang berputar secara horizontal-axis



■ Baling-baling yang berputar secara vertikal-axis



Gambar 2.7. Jenis-Jenis Kincir Angin Pembangkit Listrik.