



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan media angin sebagai sumber energinya untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit ini dapat mengubah energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin. Sistem pembangkit listrik ini merupakan sistem alternatif yang sangat berkembang pesat saat ini, mengingat angin merupakan salah satu energi yang banyak tersedia di sekitar kita.

Secara umum pembangkit listrik tenaga angin memanfaatkan tiupan angin melalui baling-baling yang terhubung dengan rotor kemudian ke gearbox dan di teruskan ke generator untuk menghasilkan energi listrik. Alat ini sangat cocok sekali digunakan pada masyarakat yang tinggal di pulau-pulau kecil dan pesisir pantai maupun pegunungan.

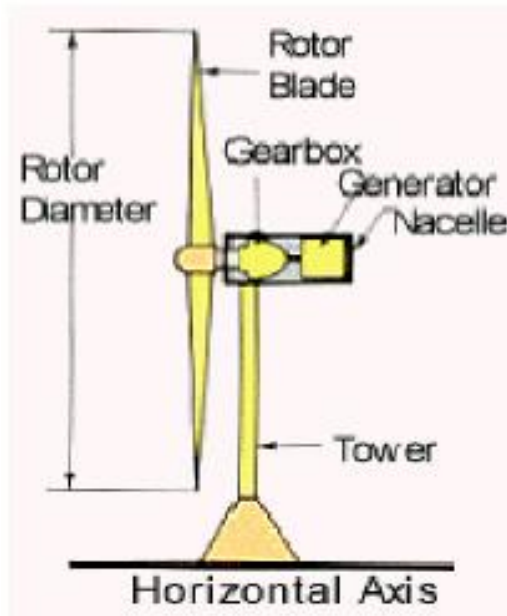
2.2 Komponen Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Sistem pembangkit listrik tenaga angin ini merupakan pembangkit listrik yang menggunakan turbin angin (*wind turbine*) sebagai peralatan utamanya.

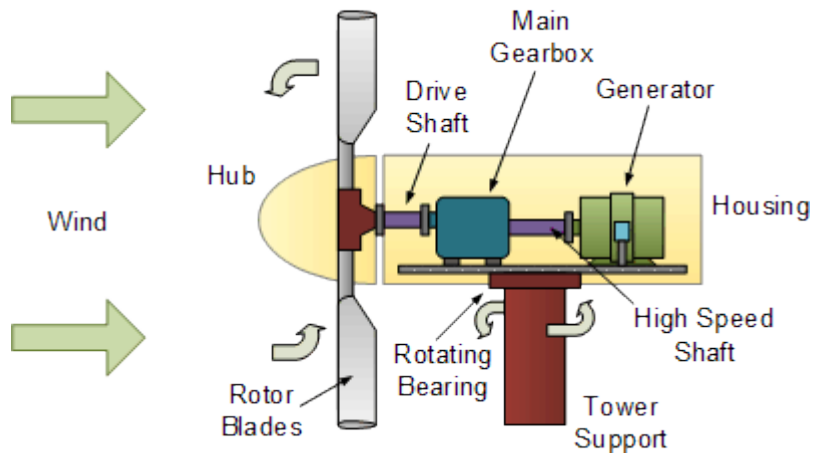
Komponen-komponen yang ada di dalam turbin angin yaitu :

1. Blades/Sudu : Turbin dibuat pada umumnya menggunakan dua atau tiga sudu, dimana pada komponen inilah yang akan menerima tiupan angin untuk mengerakkan poros.
2. Low-speed shaft : Berfungsi meneruskan putaran rendah ke poros rangkaian roda gigi.
3. Gear box : Rangkaian roda gigi yang menghubungkan poros kecepatan tinggi dengan poros kecepatan rendah dan meningkatkan kecepatan dari sekitar 30-60 rpm hingga sekitar 240-480 rpm.
4. High-speed shaft : Mengubah poros rotor kecepatan tinggi hingga sekitar 240-480 rpm.
5. Generator : Sebuah induksi generator yang dapat menghasilkan energy listrik dari 60 siklus listrik AC/DC.

6. Tower : Menara yang terbuat dari baja tabung, beton atau kisi baja dan di bangun dengan tinggi agar memungkinkan turbin dapat menangkap lebih banyak energi angin dan dapat menghasilkan listrik lebih banyak.
7. Sirip Ekor : Digunakan untuk menjaga rotor selalu menghadap ke arah angin agar baling-baling dapat menangkap angin dengan maksimal
8. Penyimpanan energi (*Baterai*) : Alat penyimpanan 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 tetap dapat terpenuhi.



Gambar 1.1 Bagian-bagian turbin angin



Gambar 1.2 Bagian-bagian turbin angin

2.2.1 Jenis Turbin Angin

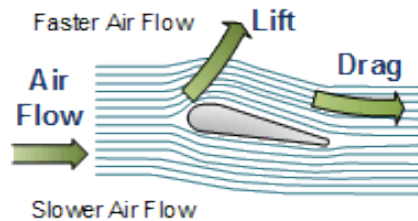
Gambar di atas menunjukkan komponen dasar yang digunakan untuk membuat desain turbin angin. Turbin angin mengubah energi kinetik dari angin dengan memperlambat laju angin dan mengubahnya menjadi energi putar dan kemudian diteruskan ke poros generator, maka dalam pembuatan kincir angin sangatlah penting untuk memiliki desain yang sangat bagus. Daya yang tersedia untuk dihasilkan bergantung pada kecepatan angin dan area yang disapu oleh bilah turbin yang berputar. Jadi semakin cepat kecepatan angin atau semakin besar bilah rotor, maka semakin banyak pula energi yang akan dihasilkan. Kita juga dapat mengatakan bahwa produksi tenaga turbin angin bergantung pada interaksi antara baling-baling dan angin dan interaksi inilah yang penting untuk desain turbin angin.

Secara umum turbin angin dapat dibagi menjadi 2, yaitu Sumbu horisontal dan sumbu vertikal. Desain turbin angin sumbu horisontal dapat menangkap lebih banyak angin sehingga keluaran/output daya lebih tinggi daripada desain turbin angin sumbu vertikal. Kerugian dari desain sumbu horisontal adalah menara yang dibutuhkan untuk menunjang turbin angin jauh lebih tinggi dan desain bilah rotor harus jauh lebih baik. Sedangkan untuk turbin angin vertikal atau VAWT, lebih mudah dirancang dan dipelihara namun mempunyai kinerja yang lebih rendah daripada tipe sumbu horisontal karena desain sudu rotornya yang sederhana. Sebagian besar turbin angin yang menghasilkan listrik saat ini baik secara komersial

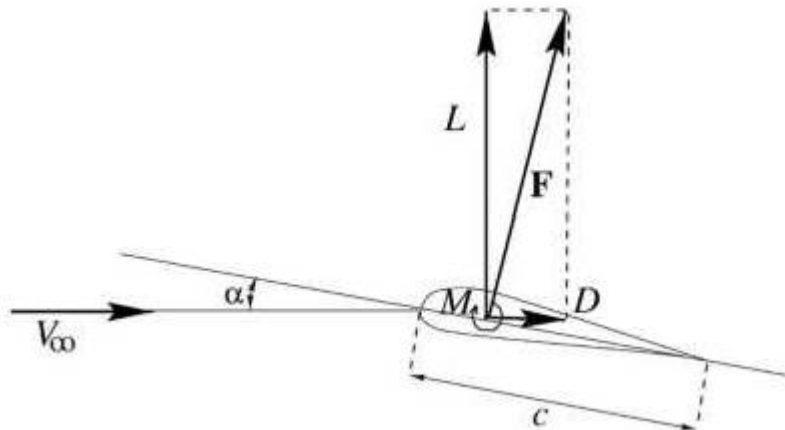
maupun domestik adalah tipe horizontal. Dan yang akan kami gunakan untuk penelitian disini adalah turbin angin dengan sumbu horizontal.

1. Turbin Angin Horizontal

Turbin angin dengan sumbu horizontal mempunyai sudu yang berputar dalam bidang vertikal seperti halnya propeller pesawat terbang. Turbin angin ini biasanya mempunyai sudu dengan bentuk irisan melintang khusus di mana aliran udara pada salah satu sisinya dapat bergerak lebih cepat dari aliran udara di sisi yang lain ketika angin melewatinya. Fenomena ini menimbulkan daerah tekanan rendah pada belakang sudu dan daerah tekanan tinggi di depan sudu. Perbedaan ini membentuk gaya yang menyebabkan sudu berputar.



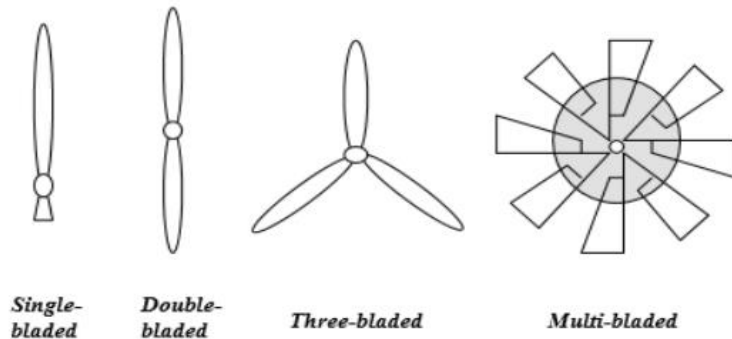
Gambar 1.3 Aliran udara saat melewati sudu



Gambar 1.4 Gaya lift dan drag saat melewati sudu (Sumber: Hansen, 2007:8)

Jumlah sudu rotor yang dirancang dengan desain turbin angin dapat ditentukan oleh efisiensi, aerodinamis dan biaya. Turbin angin yang ideal memiliki banyak sudu yang tipis namun kebanyakan generator turbin angin sumbu horisontal hanya memiliki satu, dua atau tiga sudu. Ketika kita mengubah dari 2 buah sudu ke 3 buah sudu peningkatan efisiensi desain bertambah sekitar 3% dan jika menambah jumlah

sudu lebih dari 3 buah hanya memberikan sedikit peningkatan efisiensi daya sekitar 0,5% namun dari segi ekonomis biayanya jauh lebih mahal, jadi jika lebih dari tiga sudu biasanya tidak diperlukan (www.learnengineering.org). Umumnya, semakin sedikit jumlah bilah, semakin sedikit bahan yang dibutuhkan dan selama dalam pembuatannya dapat mengurangi biaya dan kompleksitas keseluruhannya.



Gambar 1.5 Berbagai jenis blade turbin angin tipe horizontal

Kelebihan Turbin Angin Horisontal

1. Tower-nya di buat tinggi agar memungkinkan untuk mendapatkan angin dengan maksimal.
2. Efisiensi lebih tinggi, karena sudu/blade selalu bergerak tegak lurus terhadap arah angin dan dapat menerima daya sepanjang putaran. Sebaliknya pada turbin tipe vertikal, melibatkan gaya timbal balik yang membutuhkan permukaan airfoil untuk mundur melawan angin sebagai bagian dari siklus back tracking melawan angin menyebabkan efisiensi lebih rendah.

Kekurangan Turbin Angin Horisontal

1. Dibutuhkan konstruksi tower yang cukup besar untuk menopang beban blade, gear box dan generator.
2. Komponen-komponen dari turbin angin horisontal (blade, gear box dan generator) harus diangkat bersamaan ke posisinya pada saat pemasangan.
3. Karena kontruksi yang tinggi, maka turbin ini bisa terlihat pada jarak yang jauh dan cukup merusak pemandangan bagi sebagian orang.
4. Membutuhkan kontrol atau mekanisme untuk selalu mengarahkan blade ke arah angin
5. Pada umumnya membutuhkan sistem pengereman pada angin yang kencang untuk mencegah turbin mengalami kerusakan.



2. Turbin Angin Vertikal

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 lainnya dapat ditempatkan dekat dengan permukaan tanah, sehingga tower tidak perlu penopang dan hal ini menyebabkan perawatan lebih mudah. Kekurangan utama dari turbin angin vertikal adalah menciptakan dorongan balik saat berputar.

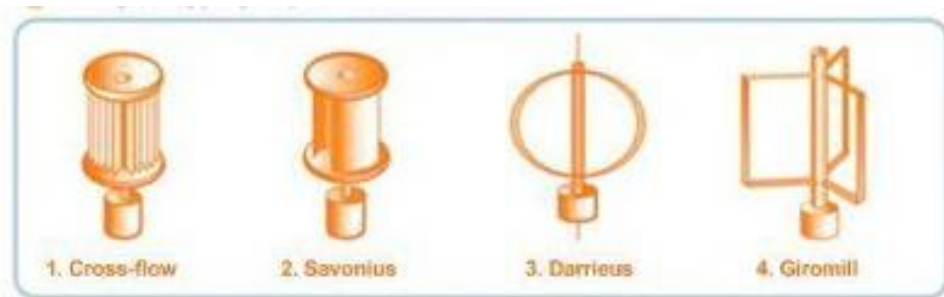
Sangat sulit untuk memasang turbin angin di tower, sehingga jenis tower ini biasanya di pasang dekat dengan permukaan tanah. Kecepatan angin lebih lambat pada altitude yang rendah, sehingga energi angin yang tersedia lebih rendah.

Kelebihan Turbin Vertikal :

1. Tidak diperlukan mekanisme yaw atau pengarah rotor, jadi dapat menerima hembusan angin dari segala arah.
2. Turbin angin bisa diletakkan dekat tanah, sehingga lebih mudah untuk menjaga dan merawat bagian yang bergerak.
3. Turbin angin vertikal memiliki kecepatan startup angin rendah dibandingkan turbin horisontal
4. Turbin angin vertikal dapat dibangun di lokasi di mana struktur yang tinggi dilarang.

Kekurangan Turbin Vertikal:

1. Kebanyakan turbin vertikal memiliki penurunan efisiensi dibanding turbin horisontal, terutama karena hambatan tambahan yang mereka miliki sebagaimana sudunya memutar balik ke arah angin datang.
2. Memiliki rotor terletak dekat dengan tanah di mana kecepatan angin lebih rendah dan tidak mengambil keuntungan dari kecepatan angin tinggi di atas.



Gambar 1.6 Berbagai jenis blade turbin angin tipe vertikal

2.2.2 Hubungan Antara Daya, Usaha dan Energi

Energi adalah ukuran kemampuan suatu benda untuk melakukan usaha.

$$F = m \times a \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana : F = gaya (Newton)

m = massa (kg)

a = percepatan (m/s^2)

Energi = kerja

$$W = F \times d \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana : W = usaha (Joule)

F = Gaya (N)

d = perpindahan (m)

Daya adalah usaha yang dilakukan per satuan waktu.

$$P = W / t \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana : P = Daya (Watt)

W = usaha (Joule)

t = waktu (s)



Persamaan gaya lift disebutkan sebagai berikut:

$$L = Cl \frac{\rho}{2} Av^2 \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana : L = gaya lift (Newton)
 Cl = koefisien lift

Koefisien lift di dapat dari :

$$Cl = 2 \pi \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Yang mana $\sin \alpha$ adalah angle of attack (sudut sudu kincir angin)

2.2.3 Hubungan Antara Daya, Torsi dan Kecepatan Putaran Kincir Angin

Daya adalah torsi dikalikan putaran (kecepatan sudut).

$$P = T \cdot \omega = T \cdot n \cdot 2\pi / 60 \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana : P = Daya (Watt)

T = Torsi (N.m)

n = kecepatan putaran (rpm)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

2.2.4 Energi Kinetik Angin

Energi kinetik adalah energi yang dimiliki suatu benda akibat gerakannya.

$$Ek = W = \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana : Ek = Energi kinetik angin (Joule)

W = usaha (Joule)



m = massa angin (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

Angin yang menggerakkan sudu merupakan udara yang bergerak dan mempunyai massa, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$m = \rho A v t \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana : m = massa angin (kg)

ρ = berat jenis angin (kg/m^3) = $1,2 \text{ kg/m}^3$

A = luasan bidang baling-baling kincir angin (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

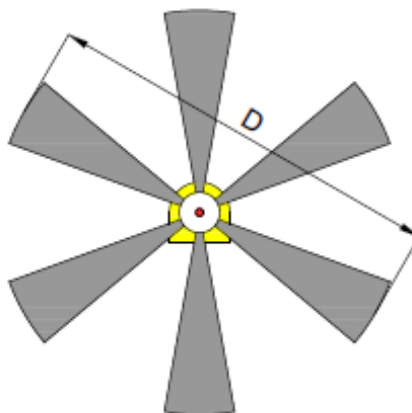
t = waktu (s)

Luasan bidang kincir angin :

$$A = \pi r^2 \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana : A = luasan bidang kincir angin (m^2)

r = jari-jari kincir angin (m)



Gambar 1.7 Diameter kincir angin



2.2.5 Daya Angin (P_A)

Daya angin adalah daya (watt) yang dibangkitkan oleh angin tiap luasan, sehingga daya angin dapat digolongkan sebagai energi potensial.

Pada dasarnya daya angin merupakan angin yang bergerak per satuan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P_A &= E_k / t \\
 &= \frac{1}{2} m v^2 / t \\
 &= \frac{1}{2} (\rho A v t) v^2 / t \\
 &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots\dots\dots (2.10)
 \end{aligned}$$

Dimana : E_k = Energi kinetik angin (Joule)

m = massa angin (kg)

ρ = berat jenis angin (kg/m^3)

A = luasan bidang baling-baling kincir angin (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

t = waktu (s)

2.2.6 Daya Kincir Angin (P_m)

Kincir angin dapat menghasilkan daya yang lebih kecil daripada daya angin itu sendiri. Hal ini dikarenakan adanya koefisien daya yang mempengaruhi daya kincir angin. Dimana koefisien daya adalah prosentase daya yang terdapat pada angin yang dirubah ke dalam bentuk energi mekanik.

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot C_p \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana : P_T = Daya turbin kincir angin (Watt)

ρ = berat jenis angin (kg/m^3)



A = luasan bidang baling-baling kincir angin (m^2)

v = kecepatan angin (m/s)

C_p = Koefisien daya

Daya mekanik pada kincir angin sendiri dipengaruhi oleh besarnya momen inersia pada sudu dan percepatan sudut pada kincir angin.

Untuk mencari momen inersia pada benda yang berotasi :

$$I = m \cdot r^2 \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana : I = momen inersia pada kincir angin (kgm^2)

m = massa sudu pada kincir angin (kg)

r = jari-jari sudu (m)

Untuk menentukan nilai percepatan sudut kincir angin :

$$\alpha = \omega^2 \cdot r \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana : α = percepatan sudut (rad/s^2)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

r = jari-jari kincir angin (m)

Besarnya nilai torsi yang dihasilkan :

$$T = I \cdot \alpha \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

Substitusi persamaan 2.12 dan 2.13 ke dalam persamaan 2.15 :

$$T = m \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot r = m \cdot \omega^2 \cdot r^3 \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana : T = Torsi pada kincir angin (Nm)

I = Momen inersia (kgm^2)

α = Percepatan sudut (rad/s^2)

ω = kecepatan sudut (rad/s)



r = jari-jari kincir angin (m)

Daya Kincir Angin :

$$P_T = T \cdot \omega \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana : P_T = Daya pada Kincir Angin (Watt)

ω = kecepatan sudut (rad/s)

T = Torsi pada kincir angin (Nm)

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa koefisien daya adalah hasil perbandingan antara daya angin dengan daya kincir angin.

$$C_p = \frac{P_t}{P_a} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana : C_p = Koefisien daya (%)

P_T = Daya pada turbin kincir angin (Watt)

P_A = Daya angin (Watt)

2.2.7 Tip Speed Ratio

Tip-speed ratio adalah perbandingan dari kecepatan ujung sudu – sudu yang berputar dengan kecepatan dari aliran udara.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

Dengan menggunakan Tip Speed Ratio, kita juga dapat menghitung besarnya nilai torsi pada kincir angin.

Hubungan Torsi dengan Tip Speed Ratio :

$$T = v \cdot R^3 / \lambda^2 \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

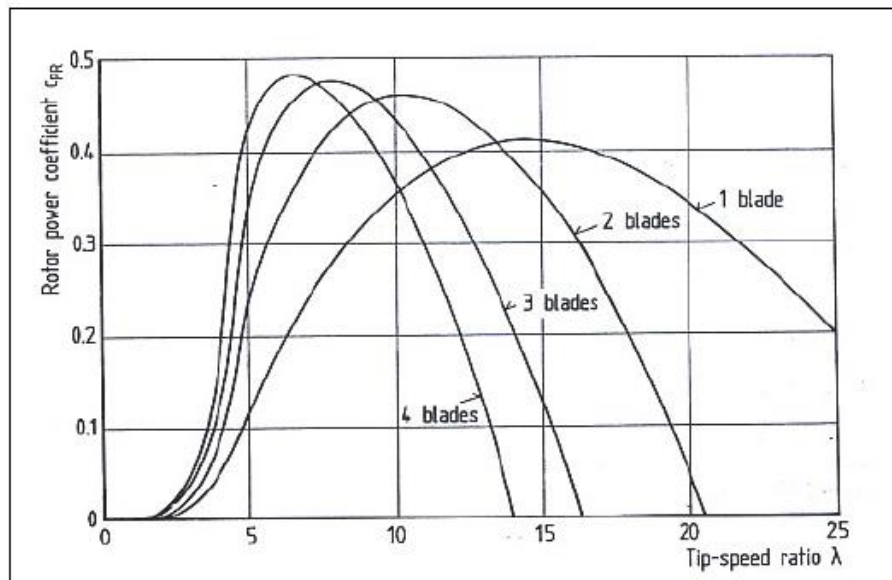
Dimana : λ = Tip speed ratio

ω = kecepatan rotasi kincir angin (rad/s)

R = jari-jari kincir angin (m)

v = kecepatan aliran angin (m/s)

T = torsi



Grafik 2.1 hubungan tip speed ratio dengan koefisien daya pada berbagai jumlah sudu

Secara teori momentum, koefisien daya dari turbin harus lebih kecil daripada nilai yang ditentukan oleh Bet'z (sekitar 0,593) / 59% karena adanya kerugian / losses pada mekanisme gerak turbin angin.

2.3 Transmisi Roda Gigi Lurus

Roda gigi lurus merupakan salah satu jenis roda gigi yang paling mendasar. Gigi-giginya lurus dan sejajar dengan sumbu poros yang membawa roda gigi tersebut. Di saat kedua roda gigi mulai berputar, maka daya yang besarnya sebanding dengan torsi segera di transmisikan.

Perbandingan kecepatan roda gigi :

$$i = Z_1 / Z_2 = n_2 / n_1 \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

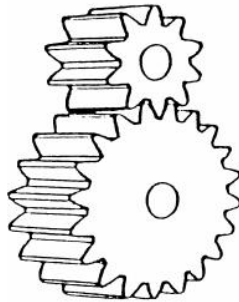
Dimana : i = rasio kecepatan

Z_1 = jumlah gigi pinion / driven

Z_2 = jumlah gigi roda gigi / driving

n_1 = putaran roda gigi pinion (rpm)

n_2 = putaran roda gigi (rpm)

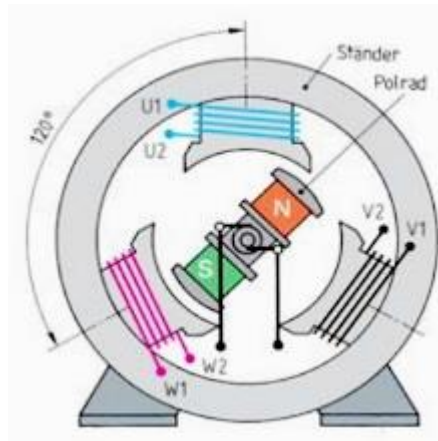


Gambar 1.8 Contoh transmisi roda gigi lurus

2.4 Generator

Generator adalah mesin listrik yang berfungsi sebagai pembangkit tenaga listrik dengan konsep kerjanya mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Maksud dari energi mekanik adalah energi gerak, baik itu dorongan, tarikan, tekanan, ataupun putaran. Biasanya Generator membutuhkan energi mekanik berupa putaran agar dapat menghasilkan energi listrik.

Sesuai dengan prinsip dari hukum Faraday bahwa apabila suatu penghantar diputar dalam sebuah medan magnet sehingga memotong garis gaya magnet maka pada ujung penghantar tersebut akan timbul gaya gerak listrik (GGL) yang memiliki satuan bertegangan (Volt).



Gambar 1.9 Dinamo generator

2.4.1 Hubungan Tegangan, Arus dan Daya Listrik Pada Generator

Tegangan listrik adalah beda potensial yang terjadi di antara dua kutub. Satuan tegangan listrik adalah Volt.

$$P_L = V \cdot I \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana : P_L = Daya listrik (satuan Watt)

V = Tegangan listrik (satuan Volt)

I = Arus listrik (satuan Ampere)

2.4.2 Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem adalah perbandingan antara daya listrik yang dihasilkan pada generator dengan daya kinetik yang dihasilkan oleh angin.

Nilai efisiensi sistem dapat ditentukan pada persamaan berikut :

$$\eta = \frac{P_L}{P_A} \times 100\% \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana : P_L = Daya listrik yang dihasilkan generator (Watt)

P_A = Daya angin (Watt)