

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis berpedoman dari penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, berikut referensinya antara lain:

Anang Nungky Ristyanto (2012) Simulasi Perhitungan Efisiensi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) REMBANG. Diperoleh kesimpulan bahwa nilai efisiensi untuk jenis pembangkit (PLTU) batubara dengan pendingin umumnya sekitar 35%, apabila nilai efisiensi dibawah 35% maka pembangkit kurang baik untuk beroperasi, sedangkan jika nilai efisiensi diatas 36% maka masih tergolong baik dan layak untuk beroperasi.

Dwi Cahyadi (2015) Analisa Perhitungan Efisiensi Turbine Generator QFSN-300-2-20B UNIT 10 DAN 20 PT. PJB UBJOM PLTU REMBANG. Menyimpulkan bahwa pada Unit 10 nilai efisiensi terendah terjadi pada hari ke-sembilan yaitu pada tanggal 10 Februari 2015 sebesar 90.75%, sedangkan nilai efisiensi tertinggi terjadi pada hari ke-dua (3 Februari 2015) sebesar 95.93%. pada unit 20, nilai efisiensi terendah terjadi pada hari ke-delapan (9 Februari 2015) sebesar 90.46%, sedangkan nilai tertinggi terjadi pada hari ke-enam sebesar 94.66%. Generator tersebut dikatakan baik dikarenakan nilai efisiensinya diatas 50%.

Supian Sauri (2018) Analisis Perhitungan Efisiensi Mesin Turbin Pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di PT. Indonesia Power Unit Pembangkit Mrica Sub-Unit PLTA Wonogiri. Menyimpulkan bahwa nilai efisiensi rata-rata mesin turbin unit 1 terendah dibulan Januari 2017 sebesar 72.4% dan untuk unit 2 dibulan November 2017 sebesar 68.1%. Sedangkan untuk bulan Oktober nilai efisiensi sebesar 0% dikarenakan tidak beroperasinya mesin turbin sebab air di waduk gajah mengalami kekeringan akibat musim kemarau yang panjang sehingga elevasi waduk tidak mencukupi standard untuk pembangkitan dan debit air tidak mencukupi untuk memutar mesin turbin.

Arief Muliawan dan Ahmad Yani (2016) Analisis Daya Dan Efisiensi Turbin Air Kinetis Akibat Perubahan Putaran Runner. Menyimpulkan bahwa efisiensi turbin sangat tergantung pada besarnya daya turbin, sedangkan daya turbin sangat tergantung pada besarnya torsi dan kecepatan anguler. Semakin besar debit air maka efisiensi turbin kinetik semakin meningkat dikarenakan adanya penambahan kecepatan aliran dan massa aliran yang menumbuk sudut turbin sehingga sehingga gaya tangensial yang dihasilkan meningkat dan gaya tangensial tersebut mempengaruhi torsi turbin, daya turbin dan efisiensi turbin kinetik.

Rohiqin Macktum (2011) Kajian Efisiensi Daya Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Dengan Turbin Pelton. Menyimpulkan bahwa hasil analisis efisiensi turbin pelton menunjukkan nilai 83.36% dengan nilai daya turbin pelton sebesar 647.67 watt sebagai daya keluaran dan nilai daya air sebagai daya masukan sebesar 750 watt. Nilai

efisiensi turbin ke generator sebesar 53.37% dengan daya generator sebesar 345.71 watt sebagai daya keluaran dalam perhitungan nilai efisiensi turbin ke generator. Sementara itu terjadi kerugian daya disalurkan sebesar 11.77 watt, namun tingkat efisiensi penggunaan daya listrik masih cukup besar yaitu 70.95%. dari ketiga kajian efisiensi mengenai PLTMH dapat dinyatakan cukup efisien secara keseluruhan karena nilai perhitungannya melebihi 50%.

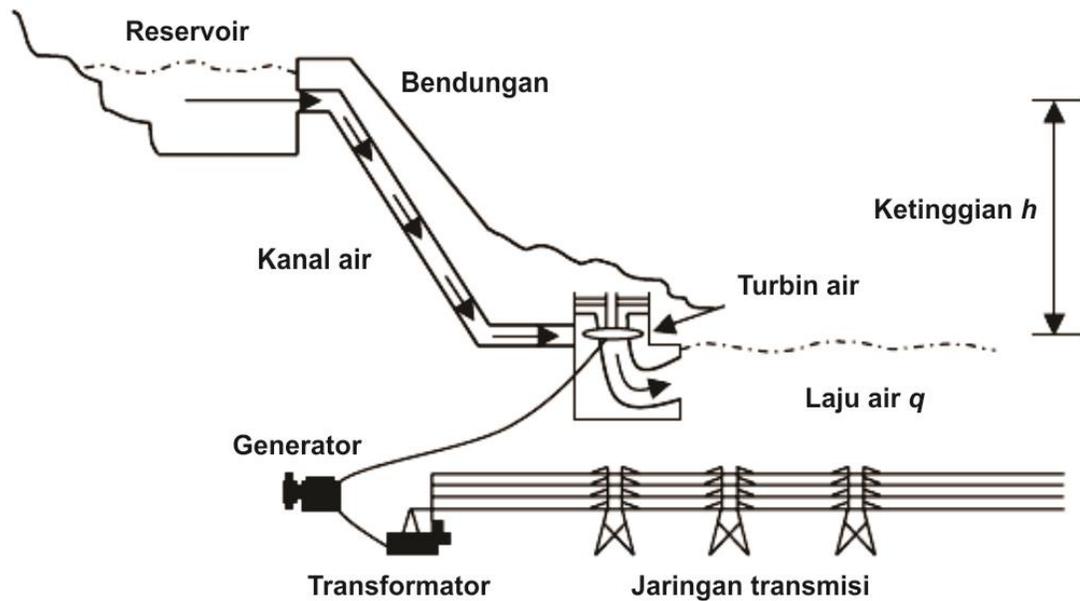
Nuraini Priyaningsih dan Nurhening Yuniarti (2017) Analisis Efisiensi Generator Pada Wind Turbine. Menyimpulkan bahwa hasil analisis yang dilakukan bahwa daya input yang dihasilkan pada kincir angin adalah 59.67% Watt sampai 201.90 Watt, sedangkan daya output yang dihasilkan adalah 2.42 Watt sampai 22.22 Watt. Efisiensi generator maksimum dan minimum yang dihasilkan berturut-turut adalah 20.68% dan 3.10% hal ini menunjukkan bahwa generator yang digunakan sudah termasuk efisiensi.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit listrik tenaga air adalah pembangkit yang memanfaatkan aliran air sebagai energi listrik. energi listrik yang dibangkitkan sering disebut sebagai hidroelektrik. Pembangkit listrik tenaga air bekerja dengan cara merubah energi air yang mengalir dari bendungan menjadi energi mekanik dengan bantuan turbin air serta dari energi mekanik tersebut menjadi energi listrik dengan bantuan generator.

Kemudian energi listrik yang dihasilkan dari PLTA dialirkan melalui jaringan-jaringan transmisi dan distribusi, hingga akhirnya energi listrik dapat digunakan oleh konsumen.



Gambar 2.1 Pembangkitan listrik tenaga air

(Sumber: <https://konversi.wordpress.com/2010/05/01/sekilas-mengenai-pembangkit-listrik-tenaga-air-plta/>)

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) terdiri dari beberapa bagian yaitu:

1. Bendungan adalah berfungsi sebagai penampungan air dalam jumlah besar untuk menciptakan tinggi jatuh air agar tenaga yang dihasilkan besar.
2. Turbin adalah berfungsi mengubah aliran air menjadi energi mekanik. Air yang jatuh dari bendungan tersebut akan mendorong baling-baling sehingga turbin dapat berputar. Perputaran turbin ini akan dihubungkan ke generator.

3. Generator adalah berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin air menjadi energi listrik. Generator dihubungkan dengan turbin melalui gigi-gigi putar sehingga ketika baling-baling turbin berputar maka generator ikut berputar.
4. Jalur transmisi adalah berfungsi mengalirkan energi listrik dari PLTA menuju pusat industri dan konsumen.
5. *Intake* adalah berfungsi sebagai pintu masuk air sungai / tandon.
6. *Penstock* adalah berfungsi mengalirkan dan mengarahkan air ke turbin serta untuk mendapatkan tekanan hidrostatik yang besar.

Jenis-jenis PLTA:

1. Berdasarkan tinggi terjun PLTA
 - a. PLTA jenis terusan air (*water way*)

Pusat listrik yang mempunyai tempat ambil air atau intake di hulu sungai dan mengalirkan air ke hilir melalui terusan air dengan kemiringan atau *gradient* yang sangat kecil.
 - b. PLTA jenis DAM (bendungan)

Pembangkit listrik dengan bendungan yang melintang di sungai, pembuatan bendungan ini dimaksudkan untuk menaikkan permukaan air dibagian hulu sungai guna membangkitkan energi potensial yang lebih besar sebagai pembangkit listrik.

c. PLTA jenis terusan dan DAM (campuran)

Pusat listrik yang menggunakan dua gabungan sebelumnya menjadi energi potensial yang diperoleh dari bendungan dan terusan.

2. Berdasarkan aliran sungai PLTA

a. PLTA jenis aliran sungai langsung (*run of river*)

Banyak dipakai dalam PLTA saluran air / terusan, jenis ini membangkitkan listrik dengan memanfaatkan aliran sungai itu sendiri secara alami.

b. Pusat listrik jenis waduk (*reservoir*)

Dibuat dengan cara membangun suatu waduk yang melintang di sungai, sehingga berbentuk seperti danau buatan, atau dapat dibuat seperti danau asli sebagai penampung air hujan sebagai cadangan untuk musim kemarau.

c. PLTA dengan kolam pengatur (*regulating pond*)

Mengatur aliran sungai setiap hari dengan menggunakan kolam pengatur yang dibangun melintang sungai serta membangkitkan listrik sesuai dengan beban. Disamping itu juga dibangun kolam pengatur di hilir untuk dipakai pada waktu beban puncak dengan suatu waduk yang mempunyai kapasitas besar dan akan mengatur perubahan air pada waktu beban puncak sehingga energi yang dihasilkan lebih maksimal.

d. PLTA jenis pompa (*pumped storage*)

Memanfaatkan tenaga listrik yang berlebihan ketika musim hujan atau pada saat pemakaian, tenaga listrik berkurang saat tengah malam. Pada waktu ini sebagian turbin berfungsi sebagai pompa untuk memompa air yang dihilir

ke hulu, jadi pembangkit ini memanfaatkan kembali air yang dipakai saat beban puncak dan dipompa lagi saat beban puncak terlewati.

2.2.2 Generator

Generator adalah suatu alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Energi mekanik bisa berasal dari panas, uap, dan air. Energi listrik yang dihasilkan oleh generator bisa berupa listrik AC maupun DC. Hal tersebut tergantung rancangan generator yang dipakai oleh pembangkit tenaga listrik. generator bekerja berdasarkan hukum *faraday*. Apabila suatu penghantar diputar dalam sebuah medan magnet sehingga dapat memotong garis-garis gaya magnet, maka pada ujung penghantar akan menimbulkan GGL (Gaya Gerak Listrik).

2.2.3 Generator Sinkron

Konversi energi elektromagnetik yaitu perubahan energi dari bentuk mekanik ke bentuk listrik dan bentuk listrik ke bentuk mekanik. Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin listrik arus bolak-balik yang menghasilkan tegangan dan arus bolak balik yang bekerja dengan cara mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan adanya induksi medan magnet (Anthony, 2013). Energi mekanis diperoleh dari putaran rotor yang digerakkan oleh penggerak mula (*prime mover*), sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang terjadi pada kumparan stator dan rotornya.

Generator sinkron dengan definisi sinkronnya, mempunyai makna bahwa frekuensi listrik yang dihasilkannya sinkron dengan putaran mekanis generator

tersebut. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan putar pada stator. Kumparan medan magnet pada generator sinkron terletak pada rotornya sedangkan kumparan jangkarnya terletak pada stator. Rotor generator sinkron yang terdiri dari belitan medan dengan suplai arus searah akan menghasilkan medan magnet yang diputar dengan kecepatan yang sama dengan kecepatan putar rotor. Hubungan antara medan magnet pada mesin dengan frekuensi listrik pada stator ditunjukkan oleh persamaan di bawah ini:

$$f = \frac{n \cdot p}{120}$$

Di mana: f = Frekuensi Listrik (Hz)

n = Kecepatan putar rotor (rpm)

p = Jumlah kutub

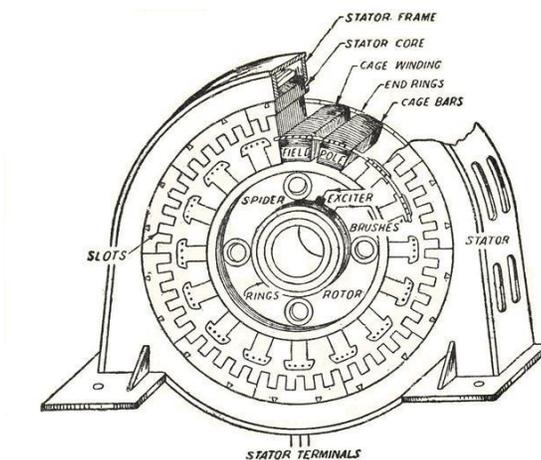
Generator sinkron sering kita jumpai pada pusat-pusat pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas yang relative besar. Misalnya pada PLTA, PLTU, PLTD dan pembangkit listrik lainnya. Selain generator dengan kapasitas besar, kita juga mengenal generator dengan kapasitas yang relative kecil misalnya generator yang digunakan untuk penerangan darurat yang sering disebut generator set.

2.2.4 Komponen Generator Sinkron

Konstruksi pada generator sinkron secara umum terdiri dari tiga komponen utama yaitu:

- a. Stator adalah bagian dari generator yang diam.
- b. Rotor adalah bagian dari generator yang berputar.
- c. Celah udara adalah ruang antara stator dan rotor.

Pada gambar 2.2 berikut, dapat dilihat konstruksi dari sebuah generator sinkron.

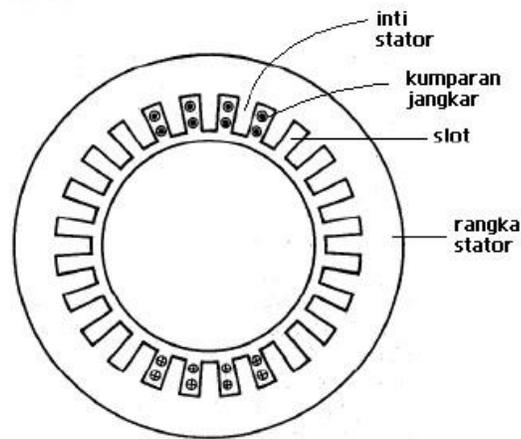


Gambar 2.2 Konstruksi Generator Sinkron

(Ennopati, 2009)

1. Stator

Stator merupakan bagian dari generator yang diam dan mempunyai alur atau *slot* memanjang yang di dalamnya terdapat belitan yang disebut dengan belitan jangkar (*Armature Winding*).



Gambar 2.3 Penampang Stator
(Rajagukguk, 2009)

Secara umum stator terdiri dari kerangka stator, inti stator, belitan stator dan *slot*.

a. Rangka Stator

Rangka stator berfungsi sebagai tempat melekatnya kumparan jangkar. Pada rangka stator terdapat lubang pendingin di mana udara dan gas pendingin disirkulasikan. Rangka stator biasanya dibuat dari besi campuran baja atau plat baja giling yang dibentuk sedemikian rupa sehingga diperoleh rangka yang sesuai dengan kebutuhan.

b. Inti Stator

Inti stator melekat pada rangka stator di mana inti ini terbuat dari laminasi-laminasi besi khusus atau campuran baja. Hal ini dilakukan untuk

memperkecil rugi arus *eddy*. Tiap laminasi diberi isolasi dan di antaranya dibentuk celah sebagai tempat aliran udara.

c. Alur (*Slot*) dan Gigi

Slot adalah tempat konduktor berada yang letaknya pada bagian dalam sepanjang keliling stator. Bentuk slot ada 3 jenis yaitu *slot* terbuka, *slot* setengah terbuka, dan *slot* tertutup.



Gambar 2.4 Bentuk-bentuk Alur/ *Slot*
(Ennopati, 2009)

d. Kumparan Stator (Kumparan Jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl induksi.

2. Rotor

Rotor berfungsi sebagai tempat belitan medan (eksitasi) yang membentuk kemagnetan listrik kutub utara-selatan pada inti rotor. Rotor terdiri dari tiga komponen utama yaitu:

a. *Slip Ring*

Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasangkan ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (*brush*) yang letaknya menempel pada *slip ring*.

b. Kumparan Rotor (Kumparan Medan)

Kumparan medan merupakan komponen yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

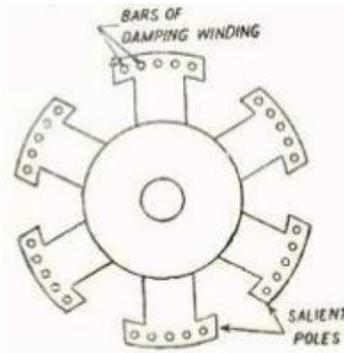
c. Poros Rotor

Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, di mana pada poros rotor tersebut telah terbentuk *slot-slot* secara parallel terhadap poros rotor.

Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet rotor dapat berupa kutub menonjol (*salient pole*) dan kutub silindris (*non salient pole*).

a. Kutub Menonjol (*Salient Pole*)

Pada jenis *salient pole*, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Belitan-belitan medannya dihubungkan seri. Ketika belitan medan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan. Rotor tipe ini mempunyai kutub yang jumlahnya banyak dan utarannya rendah. Kutub menonjol ditandai dengan rotor berdiameter besar dan panjang sumbunya pendek. Kumparan dibelitkan pada tangkai kutub, di mana kutub-kutub diberi laminasi untuk mengurangi panas yang ditimbulkan oleh arus Eddy.



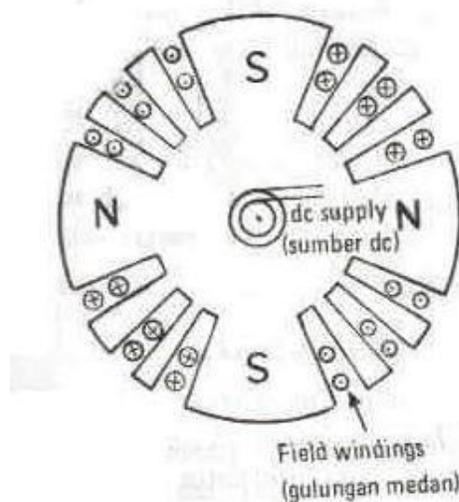
Gambar 2.5 Rotor Kutub Menonjol
(Anthony, 2013)

Gambaran bentuk kutub menonjol generator sinkron adalah seperti yang terlihat pada gambar 2.5 di atas. Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Oleh sebab itu generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub

menonjol baik digunakan untuk putara rendah dan sedang karena kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi. Selain itu, konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

b. Kutub Silindris (*Non Salient Pole*)

Pada jenis *non salient pole*, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat dari sisi luarnya. Gambaran bentuk kutub silindris generator sinkron adalah seperti pada gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Rotor Kutub Silinder (*Non Salient Pole*)
(Anthony, 2013)

Belitan-belitan medan dipasang pada alur-alur di sisi luarnya. Belitanbelitan medan dipasang pada alur-alur tersebut dan terhubung seri dengan slip yang terhubung dengan eksiter.

Rotor kutub silinder umumnya digunakan untuk kecepatan putar tinggi (1500 atau 300 rpm). Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi. Selain itu distribusi di sekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.

2.2.5 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Suatu mesin listrik akan berfungsi apabila memiliki:

1. Kumparan medan untuk menghasilkan medan magnet.
2. Kumparan jangkar, untuk mengimbaskan ggl pada konduktor konduktor yang terletak pada alur-alur jangkar.
3. Celah udara yang memungkinkan berputarnya jangkar dalam medan magnet.

Adapun prinsip kerja dari generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut:

1. Kumparan medan yang diletakkan di rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan

medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan akan menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.

2. Penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar dengan kecepatan tertentu sesuai dengan yang diharapkan.
3. Perputaran rotor tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan.

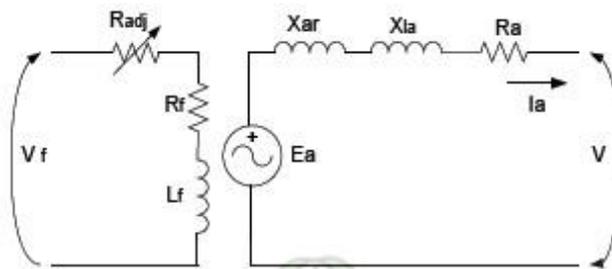
Untuk generator sinkron tiga fasa, digunakan tiga kumparan jangkar yang ditempatkan di stator yang disusun dalam bentuk tertentu, sehingga susunan kumparan jangkar yang sedemikian akan membangkitkan tegangan induksi pada ketiga kumparan jangkar yang besarnya sama tapi berbeda fasa 120° satu sama lain. Setelah itu, ketiga terminal kumparan jangkar siap dioperasikan untuk menghasilkan energi listrik.

2.2.6 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron

Stator terdiri dari belitan-belitan di mana suatu belitan konduktor akan terdiri dari tahanan (R_A) dan induktansi (L). Ketika motor bekerja maka arus akan mengalir

pada konduktor membentuk fluksi jangkar (ϕ_a) yang akan membangkitkan medan putar. Fluksi jangkar (ϕ_a) akan berinteraksi dengan fluks medan (ϕ_m) sehingga akan terjadi konversi energi dari energi listrik menjadi energi mekanik. Pada kondisi ini, ada fluks sisa yang tidak dapat berinteraksi dengan fluks medan yang disebut dengan reaktansi bocor (X_A).

Akibat adanya pengaruh reaksi jangkar dan reaktansi bocor, maka rangkaian ekuivalen suatu motor sinkron akan menjadi seperti gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron
(Ramdhani, 2008)

- Di mana:
- E = Tegangan induksi
 - V = Tegangan terminal generator
 - V_f = Tegangan eksitasi
 - R_f = Tahanan belitan medan
 - L_f = Induksi belitan medan
 - R_{adj} = Tahanan variable

X_{ar} = Reaktansi reaksi jangkar

X_{la} = Reaktansi bocor belitan jangkar

I_a = Arus Jangkar

Dari gambar 2.7 dapat ditulis persamaan tegangan generator sinkron sebagai berikut:

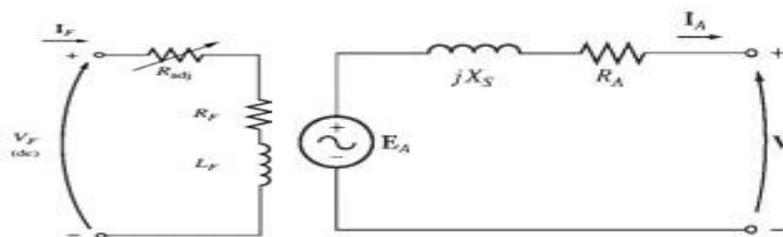
$$E = V + jX I + R I$$

Dari persamaan tegangan terminal generator sinkron dapat di tulis:

$$V = E - jX I - R I$$

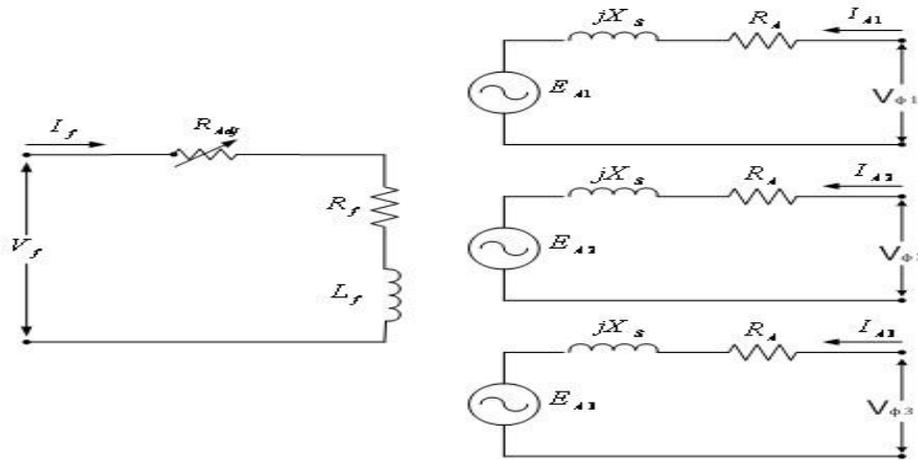
Dengan menyatakan reaktansi reaksi jangkar dan reaktansi fluks bocor sebagai reaktansi sinkron, atau $X = X + X$ dapat dilihat pada gambar 2.8 maka persamaan menjadi:

$$V = E - jX I - R I \text{ (Volt)}$$



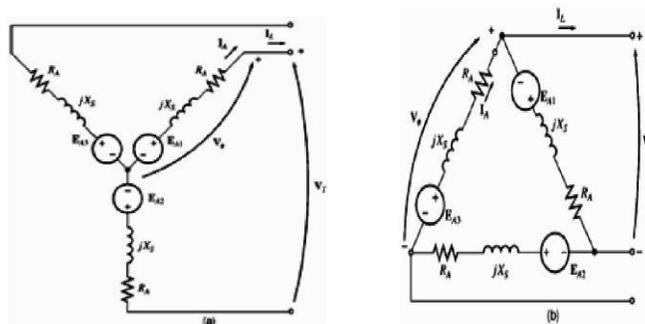
Gambar 2.8 Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron
(Ramdhani, 2008)

Karena tegangan yang dibangkitkan generator sinkron adalah tegangan bolak-balik tiga fasa, maka gambar yang menunjukkan hubungan tegangan induksi perfasa dengan terminal generator akan ditunjukkan pada gambar 2.9 berikut:



Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron Tiga Fasa
(Ramdhani, 2008)

Sedangkan untuk generator tiga fasa, rangkaian ekivalen generator sinkron ditunjukkan oleh gambar 2.10 berikut ini:



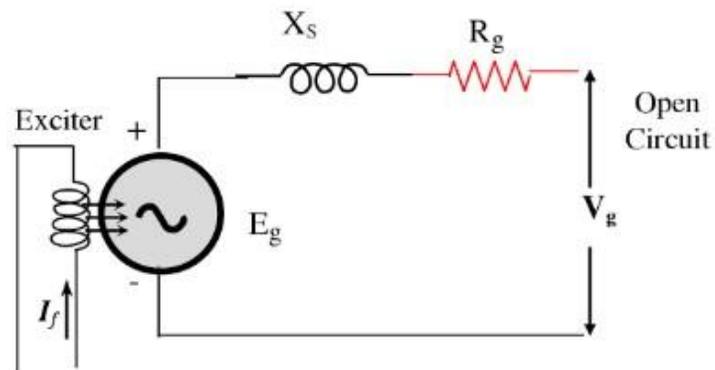
Gambar 2.10 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron
(a) Hubung-Y (b) Hubung-D
(Ramdhani, 2008)

2.2.7 Karakteristik Generator Sinkron

Dalam mesin listrik ada dua kurva karakteristik yang digunakan untuk menentukan parameter mesin. Yaitu karakteristik *open circuit* dan karakteristik hubung singkat (*short circuit*).

2.2.7.1 Karakteristik *Open Circuit*

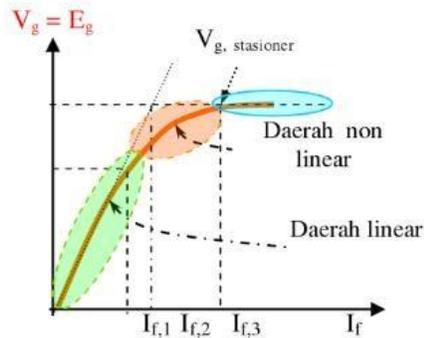
Seperti pada mesin arus searah karakteristik kurva magnetisasi dari mesin sinkron adalah kurva perubahan tegangan terminal atau ggl sebagai fungsi dari perubahan fluks atau arus medan eksitasi.



Gambar 2.11 Rangkaian Generator Sinkron Pada Kondisi *Open Circuit*

(Muslim, 2008)

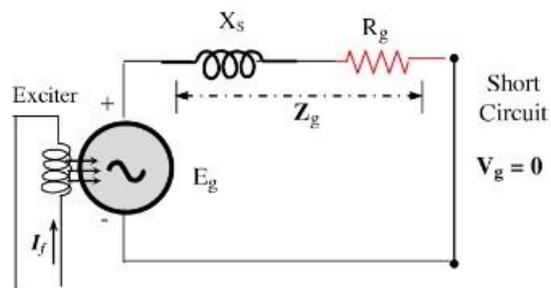
Dengan memperbesar arus medan exciter hingga I_f tertentu maka tegangan terminal akan naik dari nol dan bertambah secara linear, sampai pada suatu titik arus eksitasi terjadi perubahan arah tegangan yang tidak lagi linear dan menuju suatu kondisi yang stasioner atau kondisi jenuh dan kemudian ketika I_f terus dinaikkan hingga pada titik tertentu maka tegangan tidak lagi mengalami perubahan harga atau konstan.



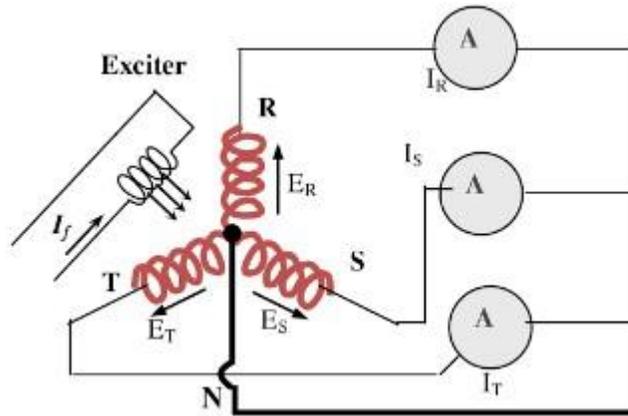
Gambar 2.12 Kurva V_g Terhadap I_f Pada Kondisi *Open Circuit*
(Muslim, 2008)

Harga dari I_{f2} sampai dengan I_{f3} adalah tambahan arus medan yang diperlukan untuk daerah jenuh. Dan besar tegangan terminal jangkar generator dalam keadaan rangkaian terbuka (*open circuit*) adalah sama dengan besar ggl ($V_g = E_g$).

2.2.7.2 Karakteristik Hubung Singkat (*Short Circuit*)



Gambar 2.13 Rangkaian Generator Pada Kondisi Hubung Singkat Satu Fasa



Gambar 2.14 Rangkaian Generator Pada Kondisi Hubung Singkat Tiga Fasa
(Muslim, 2008)

Karakteristik hubung singkat merupakan penggambaran dari hubungan antara arus fasa hubung singkat sebagai fungsi arus medan, di mana ketiga fasa generator dihubungkan singkat dengan kecepatan putar yang konstan.

Dari persamaan umum generator diperoleh: $E_a =$

$$V_g + I_g (R_g + jX_s)$$

Karena generator dalam keadaan hubung singkat, nilai tegangan terminalnya menjadi nol, sehingga:

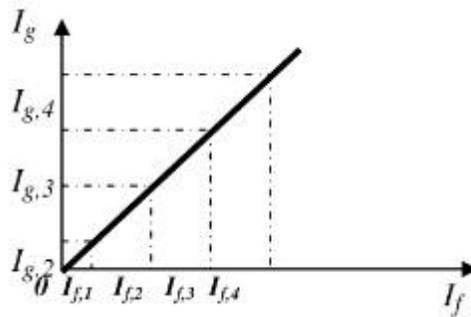
$$E_a = I_g (R_g + jX_s)$$

Pada kondisi ini $(R_g + jX_s)$, adalah konstan = K_2 , dan $I_g = H I_s$, sehingga:

$$K I I_f = I_{hs} K_2$$

$$I_{hs} = \frac{K_1}{K_2} I$$

Dari persamaan di atas, pengukuran hubung singkat berdasarkan penambahan arus medan dari kondisi nol hingga batas yang diperlukan. Karakteristik hubung singkat dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut ini:



Gambar 2.15 Karakteristik Pada Kondisi Hubung Singkat

2.2.8 Efisiensi Generator

Efisiensi generator merupakan perbandingan antara daya keluaran atau dengan daya masukan generator. Daya masukan generator sama dengan daya yang dihasilkan oleh turbin karena turbin dan generator dikopel dan bekerja bersama. Berikut rumus perhitungan efisiensi generator:

$$\eta_{gen} = \frac{P_{actual}}{P} \times 100\%$$

Dimana :

η_{gen} : Efisiensi generator (%)

P_{actual} : Daya aktual generator (MW)

P : Daya nominal (MW)

2.2.9 Turbin Air

Turbin air adalah alat untuk mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik dan kemudian dirubah menjadi energi listrik oleh generator. Turbin air merupakan peralatan utama di pembangkit listrik tenaga air (PLTA) selain generator.

2.2.10 Komponen turbin air

Komponen turbin air ada 2 yaitu:

- a. Rotor yaitu bagian yang berputar pada sistem terdiri dari sudu-sudu, poros dan bantalan. Berikut fungsi dari bagian tersebut:
 - sudu-sudu berfungsi menerima beban pancaran yang disemprotkan oleh *nozzle*.
 - poros berfungsi meneruskan aliran tenaga berupa gerak putar yang dihasilkan oleh sudu.
 - bantalan berfungsi sebagai perapat komponen dengan tujuan agar tidak mengalami kebocoran pada sistem
- b. stator yaitu bagian yang diam pada sistem terdiri dari pipa pengarah dan rumah turbin. Berikut fungsi dari bagian tersebut:
 - pipa pengarah berfungsi meneruskan aliran fluida sehingga tekanan dan kecepatan fluida yang digunakan besar.
 - rumah turbin berfungsi sebagai rumah komponen-komponen turbin.

2.2.11 Prinsip kerja turbin air

Berdasarkan prinsip kerja turbin air dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis. Aliran air yang mempunyai energi potensial akan disemprotkan ke sudu-sudu turbin oleh *nozzle*. Putaran dari sudu-sudu tersebut akan mengakibatkan poros turbin ikut bergerak dan kemudian putaran poros turbin akan diteruskan ke generator listrik menjadi energi listrik.

2.2.12 jenis-jenis turbin air

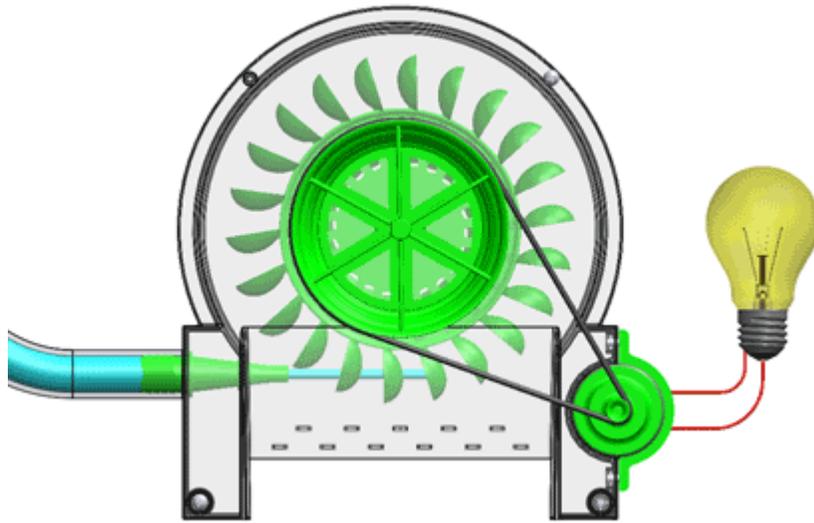
Jenis turbin air dibedakan menjadi 2 yaitu:

a. Turbin impuls

Turbin impuls adalah turbin air yang merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi kinetik untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi mekanik. Turbin impuls disebut juga turbin tekanan sama. Karena aliran air yang keluar dari *nozzle* tekanannya adalah sama dengan tekanan atmosfer sekitarnya. Contoh turbin pelton dan turbin *cross flow*.

- Turbin pelton

Turbin pelton ditemukan pada tahun 1870an oleh Lester Allan Pelton. Turbin ini memiliki beberapa jet penyemprot air untuk memutar piringan. Jenis turbin ini digunakan untuk air terjun diatas ketinggian 300 meter.



Gambar 2.16 Turbin Pelton
(<http://www.mecaflux.com/en/turbines.htm>)

- Turbin *cross flow*

Turbin *cross flow* berputar dikarenakan aliran secara *axial* maupun *radial*, pada turbin *cross flow* air mengalir secara melintang atau memotong *blade* turbin. Turbin *cross flow* dibuat untuk mengakomodasi debit air yang lebih besar dan head yang lebih rendah dibanding pelton. Pengguna turbin ini dapat menghemat biaya pembuatan penggerak untuk daya yang sama sampai 50% dari pengguna kincir air dengan bahan yang sama.



Gambar 2.17 Turbin *cross flow*
(<http://cink-hydro-energy.com/id/turbin-crossflow/>)

b. Turbin reaksi

Turbin reaksi adalah turbin air yang merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi kinetik. Turbin jenis adalah turbin yang paling banyak digunakan. Turbin reaksi disebut juga turbin tekanan lebih karena tekanan air sebelum masuk roda turbin lebih besar dari tekanan air saat keluar. Secara umum dapat dikatakan bahwa aliran air yang masuk ke roda turbin mempunyai energi penuh, kemudian energi tersebut dipakai sebagian untuk menggerakkan roda turbin dan sebagian lagi dipergunakan untuk mengeluarkan air ke saluran pembuangan.

2.2.13 Efisiensi turbin

Efisiensi turbin adalah suatu ukuran unjuk kerja atau performa suatu mesin turbin untuk menghasilkan suatu daya dimana perbandingan daya yang

dihasilkan dengan kinerja mesin turbin. Maka rumus yang didapatkan sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Turbin } (\eta_T) = \frac{P_t}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}$$

Keterangan :

η_T = Efisiensi turbin

P_t = Daya turbin (Watt)

ρ = Berat jenis air (1.000 kg/m³)

Q = Kapasitas air (m³ /s)

H = Tinggi air jatuh (head,m)

g = Percepatann gravitasi bumi (9,8 m/s²)

Pada PLTA Wadaslintang tinggi air jatuh (head) dapat dicarikan dengan persamaan yaitu: $H = \text{Elevasi Intake (mdpl)} - \text{Elevasi Tailrace (mdpl)}$