

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penulisan tugas akhir tak lepas dari tinjauan pustaka untuk mengetahui hasil penelitian yang diperoleh oleh peneliti sebelumnya dan berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Berikut ini adalah referensinya untuk mendukung penulisan tugas akhir, antara lain:

Sefto Jepersen (2016) melakukan penelitian yang berjudul Analisa Pengaruh Beban terhadap Efisiensi Generator Sinkron Unit 1 di PLTU PT. BUKIT ASAM (PERSERO) TBK Tanjung Enim-Sumatra Selatan dengan menggunakan metode perhitungan berdasarkan perbandingan daya keluaran terhadap daya masukan dan bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh beban terhadap efisiensi generator. Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa dari hasil perhitungan pada tanggal 24 Maret 2016 sampai 30 Maret 2016 menghasilkan rata-rata efisiensi generator per hari sebesar 84,745%. Dari efisiensi tersebut sangat dipengaruhi oleh beban yang terpakai. Apabila beban yang terpakai semakin besar maka efisiensi generator semakin tinggi begitu pula sebaliknya.

Dwi Aji Saputro (2016) melakukan penelitian yang berjudul Pengaruh Kecepatan Putar terhadap Tegangan dan Frekuensi Generator Induksi 1 Fase 6 Kutub dengan menggunakan metode analisis data dan bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan putar terhadap tegangan dan frekuensi keluaran yang dihasilkan oleh generator induksi dalam kondisi berbeban maupun tanpa beban. Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa ketika generator induksi dalam kondisi tanpa beban menghasilkan frekuensi 47,2 Hz sampai 54,7 Hz dan menghasilkan tegangan 107,4 volt sampai 264,7 volt dengan kecepatan putar sebesar 950 rpm sampai 1150 rpm. Pada kecepatan awal 1050 rpm dengan pembebanan resistif antara 40 watt sampai 200 watt menghasilkan tegangan 199,1 volt sampai 164,3 volt dan pembebanan lampu

hemat energi dengan 24 watt sampai 120 watt menghasilkan 186,4 volt sampai 135,6 volt. Peningkatan daya beban mengakibatkan penurunan frekuensi dan tegangan generator induksi.

Yafrisal F Sertiandi (2018) melakukan penelitian yang berjudul Analisis Perhitungan Efisiensi Turbin dan Generator di PLTA Wadaslintang dengan menggunakan metode pengambilan data kuantitatif dan bertujuan untuk mengetahui hasil perhitungan efisiensi turbin dan generator pada PLTA Wadaslintang. Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa dalam melakukan penelitian selama 5 hari efisiensi yang dihasilkan pada hari pertama 89,77%, hari kedua 89,77%, hari ketiga 91,02%, hari keempat 91,25%, hari kelima 91,59%. Selama dalam 5 hari efisiensi sangat dipengaruhi oleh beban. Nilai intake akan mempengaruhi daya turbin turun. Turbin dan generator dapat dikatakan bekerja baik dan secara optimal apabila nilai efisiensi turbin dan generator diatas 50%.

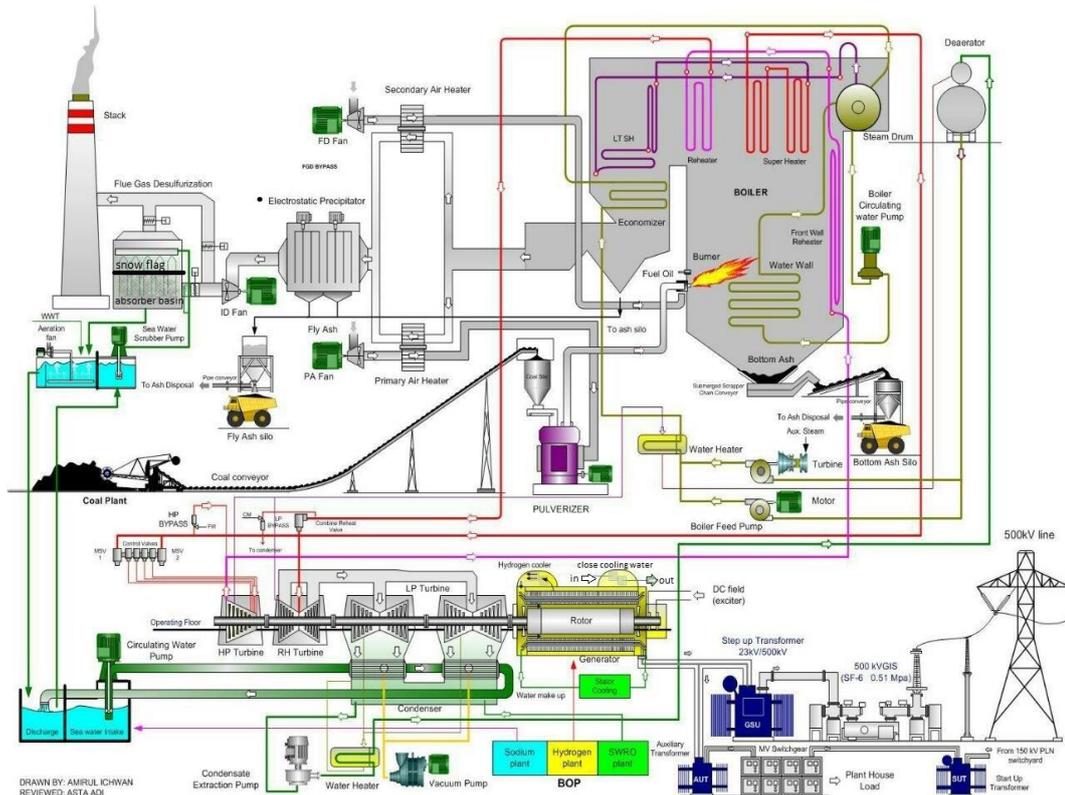
Agus Supardi, Aris Budiman, Nor Rahman Khairudin (2018) melakukan penelitian dengan judul Pengaruh Kecepatan Putar dan Beban terhadap Keluaran Generator Induksi 1 Fase Kecepatan Rendah dengan menggunakan metode kuantitatif dan bertujuan untuk mengetahui adanya pengaruh kecepatan putar dan beban terhadap keluaran generator induksi kecepatan rendah. Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi tegangan maka semakin tinggi juga kecepatan putar begitu pula sebaliknya dan semakin tinggi kecepatan putarnya makanya semakin tinggi frekuensi. Semakin rendah tegangan dan frekuensi maka semakin besar bebannya. Ketika generator kondisi tanpa beban, generator dapat membangkitkan tegangan sebesar 220 volt dan 83,9 Hz. Ketika dihubungkan dengan kapasitor sebesar 16 mikروفarad dan diputar dengan kecepatan 850 rpm. Ketika kecepatan putarnya berkisar 525 – 850 rpm maka tegangannya akan berkisar 65 – 220 volt dan frekuensinya akan berkisar 52,1 – 83,9 Hz. Variasi dengan kecepatan putar dari 605 – 850 rpm dengan pembebanan berkisar 5 – 15 watt akan menyebabkan frekuensi berkisar pada 51,8 – 85 Hz dan tegangan berkisar pada 101 – 204 volt.

Basofi, Ir. Syamsul Amien, M.S (2014) melakukan penelitian dengan judul Studi Pengaruh Arus Eksitasi pada Generator Sinkron yang Bekerja Paralel terhadap Perubahan Faktor Daya dengan menggunakan metode pengukuran di laboratorium Pusat Pengembangan Pemberdayaan Pendidik dan Tenaga Kependidikan Medan (P4TK) dan bertujuan untuk menentukan perubahan faktor daya setelah diaturnya arus eksitasi pada generator. Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa pada beban induktif, faktor daya generator mengecil menjauhi nilai 2 terjadi karena arus eksitasi pada generator diperbesar. Jika arus eksitasi pada generator diperbesar maka generator akan menyuplai daya reaktif lebih besar. Ketika generator bersifat mengonsumsi daya reaktif apabila arus eksitasi dikurangi hingga batas pengukuran. Pada beban kapasitif, faktor daya generator semakin meningkat mendekati nilai 1 terjadi karena arus eksitasi pada generator diperbesar. Jika arus eksitasi pada generator diperbesar maka generator akan menyerap daya reaktif lebih sedikit.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton Unit 7

Pembangkit listrik tenaga uap adalah pembangkit yang menggunakan sumber pembakaran batubara untuk memanaskan air untuk mengubah air menjadi uap untuk menghasilkan energi listrik. Berikut adalah skematik PLTU Paiton unit 7.



Gambar 2. 1 Skematik PLTU Paiton Unit 7
(Sumber: PT. POMI Paiton Jawa Timur)

Batu bara dipindahkan dari kapal pengangkut batu bara di *jetty* menuju *belt conveyor* dengan menggunakan *stacker* oleh suatu alat pemindah batu bara yang dinamakan *ship unloader*. Setelah batu bara dipindahkan dari kapal pengangkut batu bara ke *belt conveyor*, lalu batu bara ditransportasikan menuju tempat penampungan batu bara (*stock pile*) dengan *belt conveyor* tersebut. Penempatan batu bara di *stock pile* pun diatur sedemikian rupa sesuai dengan kualitasnya. Terdapat empat *stock pile* utama serta satu *stock pile* cadangan. Batu bara yang berada di *stock pile* tidak perlu ditutup atap karena kadar air dalam batu bara tidak akan lebih dari 40%.

Dari tempat penampungan (*stock pile*) ini, batu bara ditransportasikan ke bunker (*coal silo*) dengan menggunakan *belt conveyor*. Dari *coal silo*, batu bara dimasukkan ke *pulverizer / mill* melalui *coal feeder*. *Pulverizer* adalah tempat penghancuran batu bara supaya menjadi butiran yang halus sehingga

menyerupai bubuk / *powder*. Sedangkan *coal feeder* adalah pengatur kapasitas batu bara yang harus masuk ke *pulverizer*. Bersamaan dengan perpindahan itu batu bara diambil *sampling* nya dan diteliti di laboratorium untuk mengetahui kadar air dan kualitasnya. Setelah dari *pulverizer*, batu bara yang sudah berbentuk bubuk / *powder* akan naik menuju tempat pembakaran (*furnace*) karena dorongan udara panas dari PA (*Primary Air*) Fan. Selain sebagai pendorong, udara panas ini juga berfungsi sebagai pengering batu bara yang sudah berbentuk serbukagar lebih cepat dalam proses pembakaran di *furnace*. Udara dari PA (*Primary Air*) ini juga yang mejadi komponen utama agar dapat terjadi pembakaran di dalam *furnace*.

Proses pembakaran di dalam *furnace* diawali dengan bahan bakar yaitu solar sebagai bahan bakar yang digunakan untuk melakukan *start* yang disemprotkan pada alat semacam *spark-plug* (busi) pada kendaraan bermotor. Ada 8 buah *Spark-plug* yang terdapat di setiap *corner* (sudut) *furnace*. Setelah terjadi proses pembakaran saat *start*, perlahan-lahan batu bara menggantikan solar sebagai bahan bakar sampai akhirnya hanya batu bara saja yang digunakan sebagai bahan bakar. Apabila kualitas batu bara yang digunakan sangat jelek maka batu bara tersebut akan sulit terbakar. Sebagai akibatnya akan dibutuhkan lebih banyak jumlah batu bara untuk menghasilkan jumlah panas yang sama. Air yang akan diubah menjadi uap dalam boiler berasal dari WTP (*Water Treatment Plant*). Air yang digunakan adalah air laut yang dimurnikan sehingga menjadi air demin dan digunakan untuk menyuplai *boiler*.

Air yang digunakan dalam siklus PLTU ini disebut Air Demin (*Demineralized*), yakni air yang mempunyai kadar konduktivitas sebesar 0.015 μs (mikro siemen). Sebagai perbandingan air mineral yang kita minum sehari-hari mempunyai konduktivitas sekitar 100 – 200 μs . Untuk mendapatkan air demin ini, setiap unit PLTU biasanya dilengkapi dengan *Desalination Plant* dan *Demineralization Plant* yang berfungsi untuk memproduksi air demin ini.

Air dalam boiler berasal dari laut yang melewati berbagai macam proses di *Water Treatment Plant (WTP)* hingga menjadi air demin. Proses awal produksi air demin dimulai dari air laut yang telah disaring kotorannya kemudian dipompa oleh *Sea Water Feed Pump* ke *Coagulant Storage Tank* (air laut diberi *coagulant* untuk memadatkan partikel seperti pasir, lumpur, dan lain-lain agar dapat mengendap). Kemudian air dipompa ke *Primary Sea Water Filter* untuk menyaring partikel yang telah dipadatkan tadi, jika masih belum tersaring maka akan disaring kembali pada *Polishing Filter*. Air yang telah difilter kemudian ditampung pada *Filtered Water Storage Tank* kemudian dipompakan menuju *Cartridge Filter* setelah sebelumnya diberi antiseptik, *acid*, dan *sodium bisulphite*.

Dalam *cartridge filter* air disaring kembali untuk mendapatkan air yang lebih murni yang kemudian dijadikan air tawar melalui proses *desalination reverse osmosis*, namun air ini masih mengandung banyak karbon. Kemudian karbon dipisahkan pada *Decarbonate Tank*. Air dipindahkan ke *Permeate Storage Tank* menggunakan *Decarbonate Pump* dan *Decarbonate Blower*. Air dari *Permeate Storage Tank* ini dapat digunakan untuk menyuplai kebutuhan sehari-hari namun belum bisa digunakan untuk menyuplai boiler.

Air dari *Permeate Storage Tank* dengan menggunakan *Permeate Supply Pump* kemudian diproses lagi dengan reverse osmosis yang kedua kemudian ditampung di *Mixed Beds*. Air inilah yang disebut air demin dan ditampung dalam *Demin Water Tank*.

Air yang ditampung di WTP pertama kali disuplai ke kondensor. Dengan menggunakan *Condenser Extraction Pump* air dipindahkan ke *deareator*. Di *deareator*, kadar oksigen dikurangi agar tidak terlalu banyak terjadi oksidasi. Karena jika terjadi oksidasi maka pipa akan mudah korosi dan bisa mengakibatkan kebocoran. Air yang telah dihilangi oksigennya ditampung di *Feed Water Storage Tank*.

Selanjutnya air yang berada pada *Feedwater Storage Tank* dipindahkan ke *economizer Boiler Feedwater Pump*. Di *economizer* air mendapat pemanasan dari *furnace* yang pertama kali walaupun sebelumnya

telah beberapa kali mendapat pemanasan dari *heater*. Keluar dari *economizer*, air yang sudah bercampur dengan *steam* ditampung di *Water Separator* untuk dipisahkan antara air dan *steam*. Kemudian akan dipanaskan di *Superheater*. Di *Superheater* inilah pemanasan yang utama karena *Superheater* ini pipa-pipa *boiler* bersentuhan langsung dengan api. Disini *steam* akan ditingkatkan suhunya sampai sekitar 542 °C.

Steam yang sudah dipanaskan di *superheater* akan langsung menuju *High Pressure Turbine* (HP *Turbine*). *Steam* yang keluar setelah memutar HP *Turbine* dipanaskan lagi di boiler melewati *Reheater*. *Steam* yang dipanaskan di *reheater* tidak sepanas *steam* yang dihasilkan *superheater*.

Kemudian uap dari *reheater* akan menuju *Intermediate Pressure Turbine* (IP *Turbine*). Setelah dari IP *Turbine*, uap langsung menuju ke *Low Pressure turbine* (LP *Turbine*) tanpa dipanaskan lagi. Kemudian setelah uap memutar LP *Turbine*, uap akan mengalir ke kondensor dan dikondensasikan. Air hasil kondensasi terkumpul dan dipompakan kembali dan seterusnya. Pada waktu uap memutar turbin maka poros turbin akan ikut berputar. Poros turbin sendiri menyatu antara HP *Turbine*, IP *Turbine* dan LP *Turbine*. Dari putaran poros tersebut digunakan untuk memutar generator dan *exciter*.

Keberadaan air menjadi sangat penting dalam PLTU Paiton Unit 7 karena digunakan untuk berbagai macam keperluan, yaitu sebagai bahan utama penghasil uap. Air dimasukkan ke dalam boiler untuk nantinya dipanaskan dengan temperatur yang sangat tinggi dan berubah wujud menjadi uap air. Selain itu air juga digunakan untuk proses *cooling* atau pendinginan pada kondensor yang berguna untuk menyerap kalor dari mesin-mesin yang sedang digunakan dan sebagai *absorber* dalam proses *flue gas desulfurization* (fgd).

Ada dua jenis abu yang dihasilkan dari pembakaran batubara di dalam boiler, yakni *fly ash* dan *bottom ash*. *Fly ash* adalah abu yang berukuran cukup kecil, sehingga ia bercampur dengan gas-gas hasil pembakaran (*flue gas*). Sebagian dari abu yang dihasilkan dari proses pembakaran akan menempel pada dinding-dinding pipa boiler, terakumulasi, memadat, dan

suatu saat ia akan jatuh ke bagian bawah boiler. Abu yang jatuh ini dikenal dengan sebutan *bottom ash*.

Flue gas hasil pembakaran dalam *boiler* sebagian akan dihembuskan oleh *primary air fan* dan digunakan untuk membantu proses pengeringan dan pemanasan batu bara saat di *pulverizer*. Sebagian besar *flue gas* hasil pembakaran itu dialirkan melewati *Electrostatic Precipitator* (ESP). *Electrostatic Precipitator* berfungsi untuk menangkap debu-debu hasil pembakaran batu bara (*fly ash*). Asap akan melewati elektroda yang menyebabkan asap menjadi bermuatan listrik. Lalu dengan sendirinya *fly ash* akan menempel pada dinding elektroda yang kedua. Lalu secara berkala akan dinding elektroda yang kedua akan digoyangkan untuk menjatuhkan *fly ash* dan di tampung dalam *fly ash silo*. Asap hasil pembakaran yang sudah melewati *Electrostatic Precipitator* akan melewati *flue gas desulfurization* (fgd). Dalam *flue gas desulfurization* terdapat tirai-tirai air yang akan menyerap kandungan sulfur yang ada dalam asap hasil pembakaran, sehingga gas buang yang keluar melalui *stack* (cerobong asap) akan ramah lingkungan.

2.2.2 Turbin Uap

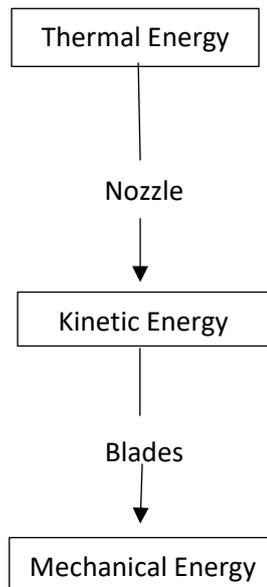
Turbin uap adalah alat mekanis yang mengesktraksi energi termal dari uap bertekanan tinggi menjadi gerakan berputar untuk menggerakkan generator. Turbin uap merupakan komponen utama di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).



Gambar 2. 2 Turbin Uap
(sumber: PLTU PT. POMI Paiton unit 7)

2.2.2.1 Prinsip Kerja Turbin Uap

Prinsip kerja dasar turbin uap yaitu pembakaran batubara untuk memanaskan air dan mengubah air menjadi uap yang panas biasa disebut energi panas, kemudian energi panas dikonversikan menjadi energi kinetik, proses mengkoversikan energi panas menjadi energi kinetic terjadi pada *nozzle* turbin. Pada *nozzle*, uap air mengalami penambahan kecepatan/ akselerasi dan menyebabkan diferensial tekanan antara sisi sebelum *nozzle* dan sesudah *nozzle*. Selanjutnya energi kinetik ditransformasikan menjadi energi mekanik berupa energi putar dari rotor turbin, dimana selanjutnya putaran pada poros tersebutlah yang juga akan memutar generator untuk menghasilkan energi listrik. Berikut adalah gamabaran umum prinsip kerja turbin uap.



Gambar 2. 3 gambaran umum prinsip kerja turbin uap

2.2.2.2 Jenis-Jenis Pressure Turbin Uap

Secara umum turbin uap memiliki jenis-jenis turbin uap yang membantu proses kerja turbin, antara lain:

a. *High Pressure Turbine (HP Turbine)*

High Pressure Turbine (HP) turbin adalah turbin yang pertama menerima *main steam* dari *superheater*. Setelah itu *output steam* akan dipanaskan di *reheater*. Ujung *High Pressure Turbine (HP turbine)* terhubung dengan *Governing Valve (GV)* dan ujung satunya berhubungan dengan *Intermediate Pressure (IP) turbine*. *HP turbine* memiliki beberapa bagian yaitu *casing, nozzle chamber, blade ring, dummy ring, LP dummy ring, blading, Rotor, Bearing, dan Gland*. Pada turbin ini juga terdapat *valve* yang berguna untuk mengatur banyaknya uap yang masuk masuk pada turbin.

b. *Intermediate Pressure Turbine (IP Turbine)*

Uap yang sudah dipanaskan di *reheater* masuk dan memutar *IP Turbine*. sedangkan untuk *IP turbine* ujungnya berhubungan dengan *LP*

turbine. IP *Turbine* memiliki beberapa bagian yaitu IP *blading* dan IP rotor.

c. *Low Pressure Turbine (LP Turbine)*

Uap kering yang keluar dari *Intermediate Pressure Turbine (IP)* diteruskan untuk diekspansikan ke *LP Turbine* tanpa perlu dipansakan lagi. Uap yang keluar dari *LP Turbine* langsung ditampung dan didinginkan oleh *condenser* untuk dikondensasikan dengan media pendingin yang berupa air laut. Setelah berupa air maka akan dipergunakan lagi sebagai air pengisi *boiler*. *LP Turbine* ini berjenis *double flow* karena dalam turbin ini terdapat dua saluran keluaran yang nantinya menuju *condenser*.

2.2.2.3 Daya Turbin

Pada PLTU Paiton dilengkapi dengan HP Turbin, IP Turbin, LP Turbin dan pemanasan dari Superheater serta pemanasan ulang dari Reheater. Dalam proses ini uap mengalami ekstraksi yaitu sebagai bocoran uap untuk memanasi air sebagai pengisi heater feedwater, sehingga untuk menghitung daya atau kerja aktual turbin didapat dengan menggunakan rumus, seperti:

$$WT = m_1(h_1 - h_2) + m_2(h_3 - h_4) + m_3(h_4 - h_5) \dots\dots\dots(2.1)$$

$$WT = WHP \text{ Turbine} + WIP \text{ Turbine} + WLP \text{ Turbine} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$WT_{actual} = \eta_{turbine} \times WT \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

WT = Daya yang dihasilkan turbin (MW)

WT_{actual} = Daya actual pada turbin (MW)

$\eta_{turbine}$ = Efisiensi turbin (%)

m₁ = Main Steam Flow (kg/h)

m₂ = Cold Reheat Steam Flow at Reheater inlet (kg/h)

m₃ = Hot Reheat Steam Flow (kg/h)

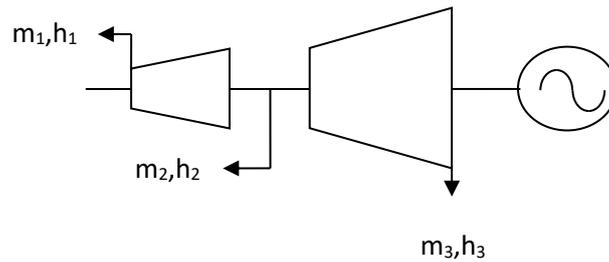
- h_1 = Main Steam Enthalpy (kJ/kg)
- h_2 = Cold Reheat Enthalpy (kJ/kg)
- h_3 = Reheater Steam Enthalpy (kJ/kg)
- h_4 = LP Turbine Exhaust Enthalpy (kJ/kg)
- h_5 = Condensate Water Deaerator Outlet (kJ/kg)

2.2.2.4 Turbin Generator pada Kondisi Ekstraksi

Efisiensi berkaitan dengan entropi dan entalpi. Entropi berasal dari dua kata, yaitu trope = change dan en = energy. Jadi, entropi merupakan energi panas yang tidak menjadi kerja akibat adanya ketidak teraturan pergerakan molekul friksi dalam kerja mekanik. Hukum termodinamika kedua menyatakan bahwa “kerja seluruhnya dapat dikonversi menjadi panas, tetapi panas tidak dapat seluruhnya dikonversi menjadi kerja”. Hukum ini mengartikan entropi sebagai ukuran tingkat degradasi energy yang terjadi disuatu system yang dilambangkan dengan “s”

Sedangkan entalpi adalah sejumlah panas yang diserap oleh air dari suhu 0°C hingga mencapai suhu tertentu atau menjadi uap pada kondisi tertentu. Jika air dari suhu 0°C dipanaskan pada tekanan tertentu hingga mencapai uap jenuh maka total panas yang di sertap sama dengan penjumlahan panas sensible (pengubah suhu) dan panas latennya (pengubah fasa), yang diberikan symbol “h”. Besarnya entalpi untuk setiap satuan berat disebut “entalpi spesifik”.

Ada beberapa metode untuk mencari efisiensi turbin, salah satunya dengan perhitungan kesetimbangan massa dan energi, dimana kesetimbangan massa dan energi adalah perbandingan antara jumlah massa uap yang masuk dan keluar turbin dengan tekanan dan temperatur tertentu dengan daya yang dihasilkan oleh generator. Skema kesetimbangan massa dan energi pada steam turbin generator dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2. 4 skema kesetimbangan massa dan energi pada kondisi ekstraksi

2.2.3 Generator

Generator adalah alat untuk membangkitkan tenaga listrik. Bagian utama dari generator sendiri yaitu stator, rotor dan celah udara. Prinsip kerja generator berdasarkan induksi elektromagnetik yaitu rotor diputar oleh penggerak mula (*prime over*) dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub disuplai oleh tegangan searah (DC) maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet yang berputar kecepatannya sama dengan putaran kutub.

Berdasarkan Hukum Faraday apabila lilitan penghantar atau konduktor diputar memotong garis-garis gaya magnet maka pada penghantar tersebut timbul EMF (*Electro Motive Force*) atau GGL (Gaya Gerak Listrik) atau tegangan induksi. GGL yang dibangkitkan penghantar jangkar adalah tegangan bolak-balik (AC). Berikut adalah gambar generator:



Gambar 2. 5 Generator pada PLTU
(sumber: PLTU PT. POMI Paiton)

2.2.3.1. Jenis-Jenis Generator

1. Jenis generator berdasarkan letak kutubnya dibagi menjadi:

a. Generator Kutub Dalam

Generator kutub dalam yaitu generator yang medan magnetnya terletak pada bagian rotor.

b. Generator Kutub Luar

Generator kutub luar yaitu generator yang medan magnetnya terletak pada bagian stator.

2. Jenis generator berdasarkan jenis arus yang dibangkitkan

a. Generator Sinkron

Generator sinkron adalah mesin pembangkit listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik sebagai output. Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik, karena itu generator sinkron disebut juga generator AC.

Menurut Anderson P.M (1982), generator sinkron dapat menghasilkan sumber energi, yaitu tegangan bolak-balik (AC). Dikatakan generator sinkron apabila urutan fasenya harus sama, tegangan harus sama, frekuensi harus sama dan sudut fase harus sama.

b. Generator Asinkron

Pada dasarnya generator asinkron tidak ada melainkan yang ada pada motor asinkron.

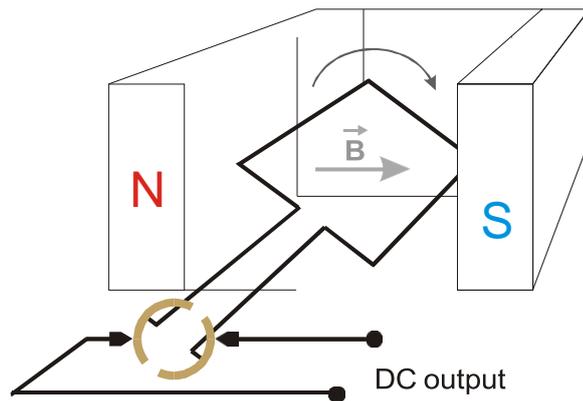
3. Jenis Generator berdasarkan jenis arus yang dibangkitkan

a. Generator Arus Searah (DC)

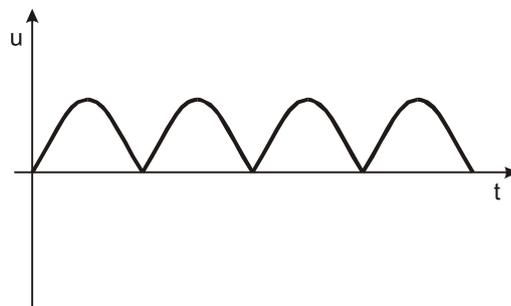
Generator arus searah (DC) yang dijelaskan dapat diubah menjadi generator DC, menggantikan cincin kontak dengan saklar mekanis. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.6, saklar sederhana dapat dilakukan dengan cincin logam yang dibagi menjadi dua bagian terpisah (segmen), yang dipasang di sumbu. Jenis komutator ini adalah kolektor denominasi.

Setiap terminal loop terhubung ke segmen kolektor. Ketika loop berputar, tegangan AC diinduksikan dalam kumparan, persis seperti pada generator AC. Tapi, sebelum mencapai beban, tegangan induksi diubah menjadi tegangan DC oleh kolektor (Gambar 2.7), yang berfungsi sebagai penyearah mekanis. Segmen kontak dari kolektor bergerak ke sikat yang berbeda setiap setengah putaran loop, menjaga arus searah mengalir melalui beban listrik dari rangkaian.

Kecepatan putaran harus ditentukan dengan baik sehingga hasil akhirnya adalah yang diharapkan. Sebagaimana dinyatakan sebelumnya, kecepatan rotasi mempengaruhi amplitudo dan frekuensi tegangan yang diinduksi.



Gambar 2. 6 Generator DC
(Pedro Portela, 2008)



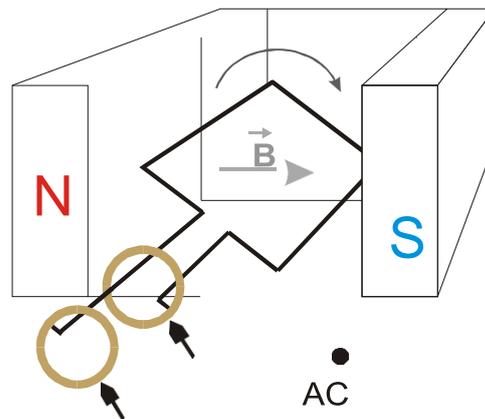
Gambar 2. 7 Output Generator DC
(Pedro Portela, 2008)

b. Generator Arus Bolak-Balik (AC)

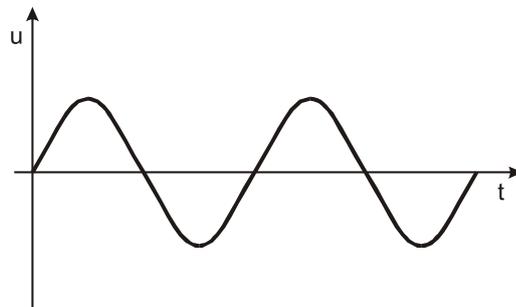
Gambar 2.8 menggambarkan prinsip pengoperasian generator AC. Sebuah lingkaran kawat berputar dalam medan magnet yang dihasilkan oleh magnet, yang menginduksi tegangan AC antara terminal loop. Perubahan periodik dari polaritas tegangan adalah karena perubahan posisi kumparan relatif ke kutub magnet. Amplitudo tegangan tergantung pada kekuatan medan magnet dan juga berbanding lurus dengan kecepatan putar (1, 2, 3, 4). Jika medan magnet seragam dan kecepatan rotasi konstan, tegangan yang diinduksi antara terminal loop adalah sinusoidal dengan nilai rata-

rata nol (Gambar 2.9). Frekuensinya sama dengan jumlah putaran per detik yang dieksekusi oleh loop.

Setiap terminal loop terhubung ke cincin logam. Kontak dengan cincin dibuat dengan sikat tetap. Jika sikat terhubung ke beban listrik, arus bolak-balik akan dibentuk di sirkuit.



Gambar 2. 8 Generator AC
(Pedro Portela, 2008)



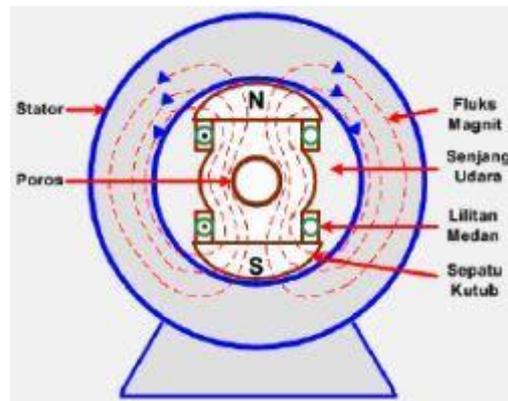
Gambar 2. 9 Output Generator AC
(Pedro Portela, 2008)

4. Jenis Generator dilihat dari fasanya
 - a. Generator Satu Fasa
 - b. Generator Tiga Fasa

5. Jenis Generator berdasarkan bentuk rotornya

a. Generator Rotor Kutub Menonjol

Pada jenis kutub menonjol, belitan-belitan medannya dihubungkan secara seri. Ketika eksiter mensuplai belitan medan, maka akan membentuk kutub yang 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.

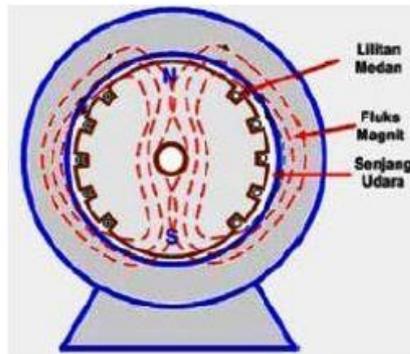


Gambar 2. 10 generator rotor kutub menonjol
(<http://electric-mechanic.blogspot.com/2010/10/generator-sinkron.html>)

Gambar bentuk kutub menonjol seperti yang terlihat pada gambar 2.10 di atas. Rotor kutub menonjol digunakan pada generator kecepatan putar rendah dan menengah.

b. Generator Rotor Kutub Rata (Silindris)

Pada jenis rotor kutub rata (silindris), konstruksi kutub magnetnya terpasang rata dengan permukaan rotor. Gambar generator kutub rata (silindris) seperti pada gambar 2.11 berikut:



Gambar 2. 11 Generator rotor kutub rata (silindris)
<http://electric-mechanic.blogspot.com/2010/10/generator-sinkron.html>

Belitan-belitan medannya dipasang pada alur-alur untuk menghasilkan kumparan medan. Generator rotor kutub rata (silindris) digunakan untuk generator dengan kecepatan putar tinggi. Rotor kutub rata baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi.

2.2.3.2 Kontruksi Generator

Konstruksi generator ini terdiri dari dua bagian utama, yaitu:

1. Rotor

Rotor adalah bagian yang bergerak pada generator. Rotor mempunyai 3 komponen utama, yaitu:

a. *Slip Ring*

Slip Ring adalah bagian dari rotor yang poros putarnya dilingkari oleh cincin logam. *Slip Ring* berguna untuk mengalirkan arus penguat magnet pada lilitan magnet rotor.

b. Kumparan Rotor

Kumparan rotor adalah komponen berfungsi untuk menghasilkan medan magnet.

c. Poros Rotor

Poros rotor adalah komponen yang berfungsi sebagai tempat kumparan medan diletakkan.

2. Stator

Stator adalah bagian yang diam pada generator. Stator pada dasarnya memiliki 4 komponen yaitu:

a. Rangka Stator

Rangka stator berfungsi sebagai rumahnya generator untuk menempatkan bagian-bagiannya pada generator.

b. Inti Stator

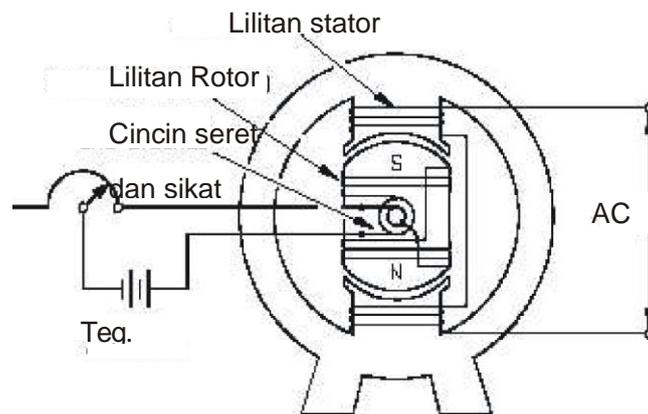
Inti stator berfungsi sebagai untuk mengatur arah medan magnet.

c. Alur (slot)

Alur (slot) berfungsi untuk tempat belitan stator ditempatkan.

d. Kumputan Stator

Kumputan stator adalah tempat terjadinya GGL induksi pada generator.



Gambar 2. 12 Kontruksi pada generator
(Sumber: Modul Teknik Dasar Generator SMK)

2.2.3.3 Karakteristik Generator Tanpa Beban

Apabila generator di putar pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), maka tegangan tanpa beban (E_o) akan terinduksi ke kumputan jangkar stator yang berarti bahwa $V_t = V_a = E_o$ dan arus armatur (I_a) = 0. Fungsi flux magner merupakan besar ggl armatur, maka ggl armature dirumusukan sebagai berikut:

$$E_a = f \cdot \Phi \dots\dots\dots(2.4)$$

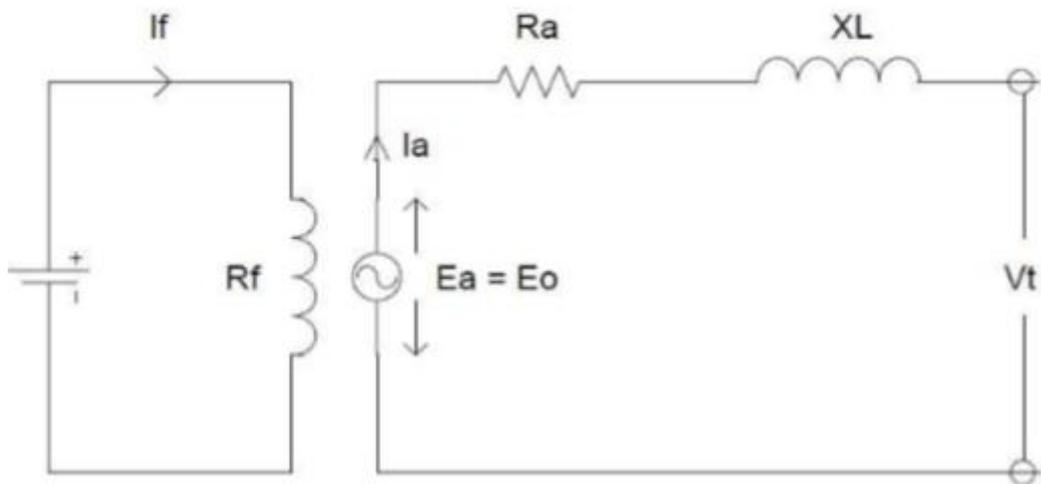
Dimana:

E_a : ggl armature

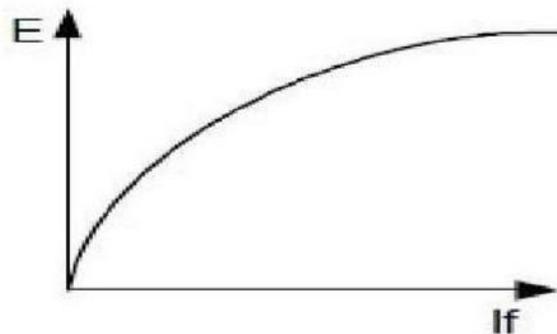
f : frekuensi (Hz)

\emptyset : fluks yang dihasilkan oleh I_f

Karakteristik generator sinkron tanpa beban yaitu hubungan antara arus medan (I_f) dengan tegangan induksi (E_a). Jika arus medan naik maka tegangan output juga akan naik sampai mendekati titik jenuh (saturasi). Berikut rangkaian generator tanpa beban dan karakteristik generator tanpa beban:



Gambar 2. 13 Rangkain Generator Tanpa Beban
(Sumber: Anonim 2007)



Gambar 2. 14 Karakteristik Generator Tanpa Beban
(Sumber: Anonim 2007)

2.2.3.4 Karakteristik Generator Berbeban

Jika generator berbeban besar ggl E tidak sama dengan tegangan terminal (V_t), maka tegangan terminalnya (V_t) akan berubah-ubah karena:

- a. Jatuh tegangan (*drop voltage*) karena resistansi jangkar (R_a) sebesar $I \cdot R_a$
- b. Jatuh tegangan (*drop voltage*) karena reaktansi bocor (X_L) sebesar $I \cdot X_L$

Arus beban yang mengalir ke kumparan jangkar, arus tersebut menimbulkan medan untuk melawan medan utama yang menyebabkan reaksi jangkar terjadi. Reaksi jangkar (X_a) akan menimbulkan reaktansi sinkron (X_s) yang menyebabkan reaktansi bocor X_L dan reaktansi sesuai dengan persamaan berikut:

$$X_s = X_L + X_a \dots \dots \dots (2.5)$$

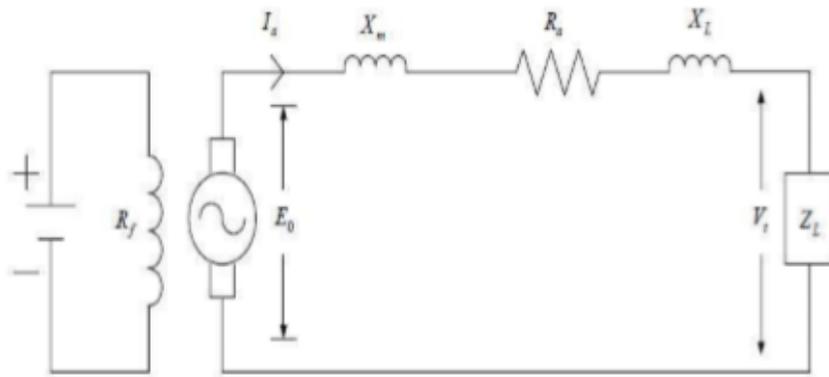
Untuk menghitung tegangan pada generator berbeban mengkitu persamaan sebagai berikut:

$$E_a = V_t + jX_a \cdot I_a + jX_L \cdot I_a + R_a \cdot I_a \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan:

- E_a : Ggl jangkar
- V_t : Tegangan terminal
- I_a : Arus beban
- R_a : Reaktansi jangkar
- X_s : Reaktansi sinkron

Berikut ini adalah rangkaian ekivalen generartor berbeban sebagai berikut:



Gambar 2. 15 Rangkaian ekivalen Generator Berbeban
(Sumber: Anonim 2007)

2.2.3.5 Daya

Daya adalah tingkat konsumsi energi dalam suatu rangkaian listrik. Daya disimbolkan dengan “P” dan dalam satuan Watt.

$$P = \frac{W}{t} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana:

P = Daya (Watt)

W= Energi (Joule)

t = Waktu (s)

Dalam daya listrik terdapat 3 macam daya sebagai berikut:

a. Daya Aktif

Daya aktif adalah daya yang sesungguhnya terpakai atau terserap dalam rangkaian listrik. Daya aktif disimbolkan dengan “P” dan dalam satuan Watt. Daya aktif dirumuskan sebagai berikut:

Untuk satu phasa $P = V \cdot I \cdot \text{Cos } \varphi$

Untuk tiga phasa $P = 3 \cdot V \cdot I \cdot \text{Cos } \varphi$

b. Daya Reaktif

Daya reaktif adalah daya yang diakibatkan oleh beban resistif dan beban resistif yang menimbulkan rugi-rugi daya. Daya reaktif disimbolkan dengan “Q” dan dalam satuan VAR. Daya reaktif dirumuskan sebagai berikut:

Untuk satu phasa $Q = V \cdot I \cdot \text{Sin } \varphi$

Untuk Tiga phasa $Q = 3 \cdot V \cdot I \cdot \text{Sin } \varphi$

c. Daya Semu

Daya semu adalah Daya yang sebenarnya di *supply* oleh PLN, merupakan resultan daya antara daya rata-rata dan daya reaktif. Daya semu disimbolkan dengan “S” dan dalam sataun VA. Daya semu dirumuskan sebagai berikut:

$$S = I_{\text{eff}} \cdot V_{\text{eff}} \dots\dots\dots(2.8)$$

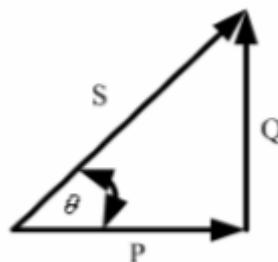
Dimana:

S : Daya semu (VA)

I_{eff} : Arus (A)

V_{eff} : Tegangan (V)

Jika digambarkan segitiga daya maka daya aktif direpresentasikan dalam bagian samping segitiga, daya reaktif direpresentasikan dalam bagian depan segitiga dan daya semu direpresentasikan pada bagian miring segitiga. Berikut adalah gambaran dari segitiga daya:



Gambar 2. 16 Segitiga Daya
(Mohamad Ramdhani, 2005)

2.2.3.6 Rugi-Rugi Generator

Rugi-rugi adalah energi yang hilang sebagai panas pada suatu sistem. Rugi-rugi akan sangat mempengaruhi efisiensi dari turbin generator. Rugi-rugi pada generator antara lain sebagai berikut:

a. Rugi Tembaga

Rugi-rugi tembaga pada generator yang diakibatkan oleh *Armature Cu, Shunt Cu, Series Cu*.

b. Rugi Besi

Rugi-rugi besi pada generator yang diakibatkan oleh rugi histerisis dan rugi arus *eddy* karena adanya fluk bolak-balik pada inti besi.

c. Rugi mekanik

Rugi-rugi mekanik pada generator yang diakibatkan pada mesin yang berputar seperti rugi sikat, rugi *bearing*, rugi angin dan *friction*.

2.2.3.7 Efisiensi Generator

Efisiensi generator adalah prosentase perbandingan daya actual yang dikeluarkan pada turbin dengan beban daya masukan dari generator. Berikut adalah rumus untuk efisiensi generator sebagai berikut:

$$\eta_{\text{generator}} = \frac{\text{Beban}}{W_{\text{tactual}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

$\eta_{\text{generator}}$ = Efisiensi generator

Beban = Daya generator

W_{tactual} = Daya actual turbin

2.2.3.8 Frekuensi dan Putaran

Frekuensi adalah jumlah getaran listrik setiap detik yang dinyatakan adalah satuan Herz atau Cycle (disingkat Hz atau c/s). Apabila dikatakan frekuensi $f = 1$ Hz, hal ini berarti rotor bergerak mengitari dua buah kutub, yaitu rotor berputar dengan jarak 3600 listrik. Oleh karena itu frekuensi tergantung pada putaran dan jumlah kutub.

Bila suatu mesin (alternator) mempunyai jumlah kutub P, tegangan induksi yang timbul dalam kawat jangkar tiap perputaran menjadi P/2 periode. Jadi sebuah alternator yang mempunyai jumlah kutub P untuk

menghasilkan tegangan induksi dengan frekuensi f , harus membuat putaran f/P perdetik atau $60 f/P$ putaran permenit (atau rpm).

Sehingga untuk putaran n berlaku hubungan:

$$n = 60 f P = 120 P \text{ rpm} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$F = n . P 120 \text{ Hz} \dots\dots\dots(2.11)$$

di mana P = jumlah kutub ($U + S$).

Rating kecepatan putaran tergantung tipe primovernya. Apabila primover dari suatu alternator mempunyai kecepatan rendah maka alternator tersebut membutuhkan banyak kutub sehingga akan tercapai frekuensinya seperti yang ditentukan. Alternator yang tipe primovernya mempunyai kecepatan tinggi maka biasanya generator tersebut mempunyai jumlah kutub 2, 4, atau 6 buah.