

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Sebelumnya, terdapat banyak penelitian yang dilakukan mengenai keandalan sistem pembangkit listrik. Studi pustaka ini dilakukan sebagai salah satu alat dari penerapan metode penelitian. Guna mendukung penyusunan skripsi ini maka penulis mengambil beberapa rujukan dari peneliti mengenai keandalan sistem pembangkit listrik diantaranya sebagai berikut:

1. Arief Muliawan, Ahmad Yani (2016) melakukan penelitian tentang analisis daya dan efisiensi pada turbin air kinetis akibat perubahan putaran runner. Penelitian turbin ini bertujuan untuk menentukan besarnya output daya dan efisiensi yang dihasilkan pada tiap variasi putaran turbin. Putaran turbin dilakukan dengan variasi 90 rpm, 70 rpm, 50 rpm, 30 rpm dan 10 rpm. Dari berbagai putaran turbin yang mengambarkan suatu perubahan daya maksimum yang terjadi pada putaran 50 rpm, 70 rpm dan 90 rpm. Pada saat kecepatan *runner* sebesar 70 rpm dengan debit 0,0078 m³ / dtk maka diperoleh daya maksimum daya sebesar 4.572 watt. Pada saat kecepatan *runner* 90 rpm dengan debit 0,0078 m³ / dtk diperoleh daya minimum dengan daya yang dihasilkan adalah 3.674 watt. Sedangkan untuk nilai efisiensi turbin maksimum adalah 28,342%, terjadi pada kecepatan 70 rpm dengan debit aliran 0,0078 m³/s, kemudian pada saat putaran *runner* 50 rpm nilai efisiensinya menurun menjadi sebesar 24,477% dan terendah pada putaran 90 rpm sebesar 23,189%. Dengan percobaan beberapa variasi kecepatan *runner* maka diperoleh perhitungan untuk nilai daya maksimal dan nilai efisiensi maksimal terjadi pada kecepatan *runner* 70 rpm dengan debit aliran 0,0078 m³/s.
2. Adly Havendri, Hendro Lius (2009) melakukan penelitian tentang perancangan dan realisasi model prototype turbin air type screw

(*Archimedean turbine*) untuk pembangkit listrik tenaga mikrohidro dengan head rendah di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi krisis energi terutama pada energi bahan bakar minyak yang makin tahun makin berkurang pesat ketersediaannya maka dilakukannya penelitian untuk membangun pembangkit listrik skala kecil yaitu Pusat Tenaga Listrik Mikrohidro (PTLMH). Dengan memanfaatkan bermacam tipe turbin air seperti tipe Turbin Screw (*Archimedean Turbine*) yang sangat berpotensi untuk pembangkit listrik mikrohidropada sungai-sungai di Indonesia. Turbin ini baru masih dalam proyek uji coba terakhir ditahun 2007 di daerah Eropa. Turbin ini digunakan untuk tinggi rendah atau Head rendah ($H < 10$ m), selain untuk potensi di sungai-sungai dengan head rendah, turbin ini juga bisa dioperasikan menggunakan saluran irigasi.

3. Yusuf Dewantoro Herlambang, Gatot Suwoto, Bono (2010) melakukan penelitian tentang unjuk kerja turbin air mikro aliran silang terhadap variasi sudut sudu jalan (runner) pada debit konstan untuk PLTMH. bertujuan agar mengetahui pengaruh dari variasi sudut sudu jalan (runner) terhadap unjuk kerja turbin dengan debit konstan. Dengan sudut sudu (β) variasi yaitu masing-masing adalah 25° , 30° , 35° , dan 40° . Penelitian yang dilakukan dimulai dari perancangan dan pembuatan (installing dan assembling), pengujian alat, serta analisis. Turbin ini memiliki dimensi yaitu diameter luar (D_1) 135 mm, diameter dalam (D_2) 90 mm, diameter poros (d_p) 19 mm dan panjang sudu 76 mm. Pengujian turbin ini akan diukur dari berapa besar debit aliran fluida yang akan memutar turbin berdasarkan variasi buka katup hingga diperoleh beda tekanan, temperature air, tekanan keluar dan masuknya keturbin, tegangan dan arus, torsi, dan putaran dari generator. Diperoleh hasil dari kinerja turbin yaitu pada aliran silang dengan sudut sudu (β) 30° memiliki efisiensi turbin yang optimum pada debit konstan $0,00423 \text{ m}^3/\text{s}$ yaitu 70,527% pada putaran 824 rpm

saat pembebanan 725 Watt. Sementara efisiensi maksimum turbin dengan sudut sudu 25^0 , 35^0 , dan 40^0 berturut-turut adalah 66,126%, 64,002%, dan 66,904%.

4. Djoko Luknanto (2008), menjelaskan berbagai macam teori tentang turbin air yang dituliskan dalam diklat kuliah dengan teori-teori yang dikutip dari beberapa sumber tentang bangunan tenaga air. Didalamnya dibahas meliputi pengertian turbin air, jenis turbin air, karakteristik turbin, seleksi awal jenis turbin, evolusi turbin, efisiensi turbin, korelasi antar turbin, kavitasasi dan definisi diameter turbin.
5. Mokhammad Tirono (2012), melakukan penelitian tentang pemodelan turbin cross-flow untuk diaplikasikan pada sumber air dengan tinggi jatuh dan debit kecil. Penelitian ini dilakukan dengan cara memodifikasi dan rekayasa pada turbin cross-flow, untuk perhitungan rekayasanya diambilkan pada perhitungan dengan merubah jumlah sudut, jumlah putaran, daya turbin, dan efisiensi turbin. Selain itu rekayasa pada turbin cross-flow dilihat pada penggunaan bentuk saluran yang akan digunakan beberapa saluran itu ialah saluran terbuka berbentuk persegi, setengah lingkaran dan trapesium. Data penelitian diambil langsung sesuai dengan keadaan dilapangan, data berupa data lebar turbin, diameter luar turbin, lebar penampang saluran, jari-jari saluran, kemiringan saluran, kecepatan alir, dan tinggi jatuh aliran. Hasil penelitian yang dilakukan pada turbin dengan jumlah sudu 12 dihasilkan jumlah putaran, daya turbin, dan efisiensi turbin yang paling besar berada pada asumsi lebar penampang 4 m, tinggi jatuh 2 m, jari-jari 2 m, kemiringan $1/\sqrt{3}$, kecepatan aliran 2 m/s, diameter luar turbin 0,75 m, dan lebar turbin 4,3 m.

2.2 Landasan Teori

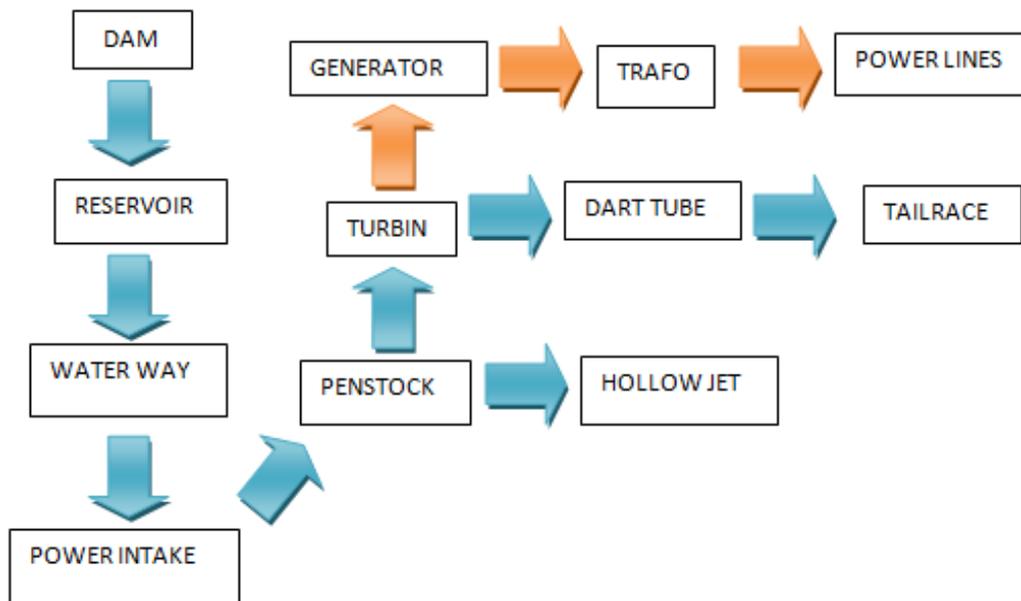
2.2.1 PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air)

Pembangkit Tenaga Listrik merupakan bagian dari sistem tenaga listrik, pada pembangkit tenaga listrik itu sendiri ada beberapa peralatan yang mendukung pembangunan dari pembangkit tersebut seperti adanya peralatan kelistrikan, mesin-mesin, dan bangunan sipil/kerja. Pembangkit tenaga listrik juga mempunyai komponen-komponen utama untuk pembangkitan energi listrik yaitu turbin, generator, dan trafo. Turbin berfungsi sebagai komponen untuk merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Contohnya PLTA (Pembangkit listrik tenaga air) merupakan suatu rangkaian peralatan yang digunakan untuk mengubah energi air menjadi energi listrik melalui mekanisme perubahan energi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 tanda panah berwarna biru merupakan aliran air sedangkan berwarna jingga merupakan aliran listrik. Penjelasan gambar 2.1 diagram blok pembangkit listrik tenaga air secara umum dijelaskan sebagai berikut :

1. Energi potensial air adalah air pada dam/waduk yang memiliki ketinggian dan debit tertentu yang dapat dimanfaatkan.
2. Energi kinetik air adalah air yang memiliki kecepatan dengan memanfaatkan *head* (perbedaan ketinggian air pada waduk dengan ketinggian air pada *tailrace*) dengan mengalirkan melewati *penstock*.
3. Energi mekanik air yaitu ketika air yang memiliki kecepatan dimanfaatkan untuk memutar turbin.
4. Energi listrik yaitu energi mekanik yang dihasilkan turbin dimanfaatkan untuk membangkitkan tegangan yang stabil pada beban yang berubah-ubah kemudian energi listrik dinaikan tegangnya pada trafo utama dan disalurkan ke konsumen atau GI melalui *switchyard*.

Sub Unit PLTA Wonogiri merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan aliran sungai Begawan Solo dari bendungan Wonogiri sebagai tenaga penggerak generator sehingga menghasilkan listrik. Kapasitas terpasang pada sub Unit PLTA Wonogiri adalah 12,4 MW (2 x 6,2 MW)

yang disalurkan ke Gardu induk Pelem Wonogiri melalui jaringan tegangan menengah 20 kV. Sub Unit PLTA Wonogiri merupakan pembangkitan listrik tenaga air yang memanfaatkan kolam tando/waduk dengan bendungan besar sebagai penimbunan air.



Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Air.
(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

2.2.2 Bagian-Bagian atau Komponen Utama PLTA

a. Waduk (*Reservoir*)

Waduk atau *reservoir* adalah kolam alam atau kolam buatan, yang berfungsi sebagai penyimpan atau pembendungan air sungai dan air hujan. Pada PLTA yang memanfaatkan kolam tando/waduk, proses terjadinya kolam tando/waduk ini dikarenakan aliran sungai dan air dari curah hujan yang terkumpul kemudian dibendung dengan skala besar maka akan terjadi proses penimbunan air sehingga membentuk suatu kolam/waduk. Air dalam waduk akan dialirkan ke bangunan PLTA. Pada saat kolam tando/waduk memiliki kapasitas air yang banyak bahkan sampai lebih dari kapasitas bendungan maka limpahan air akan langsung dialirkan melalui pintu keluar dibendungan. Pada saat musim kemarau panjang waduk akan berada di posisi kekeringan, air di waduk akan langsung disalurkan ke

masyarakat melalui pintu bendungan utama PLTA wonogiri. Data teknis waduk dan gambar waduk gadjah mungkur dapat dilihat pada tabel 2.1 dan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Waduk Gajah Mungkur
(Sumber :<http://bolehtanya.com/wisata/waduk-gajah-mungkur/>)

Tabel 2.1 Data Teknis Waduk Gajah Mungkur

Parameter Data	Satuan
Luas daerah genangan	8.800 ha
Luas daerah yang dibebaskan	9.496.775 ha
Hidrologi (Hydrology)	
Luas Daerah Aliran	1.350 km ²
Curah hujan rata – rata pertahun	2.074 mm
Ketinggian muka air (elevasi)	
Muka air banjir maksimal	139,10 mdpl
Muka air banjir rencana	138,30 mdpl
Muka air normal	135,00 mdpl
Muka air minimum	127,00 mdpl
Muka air tertinggi	137,0 mdpl
Daya tampung waduk (Storage Capacity)	
Volume waduk banjir rencana	750.000.000 m ³
Volume waduk normal	560.000.000 m ³
Volume waduk efektif pengendali banjir	220.000.000 m ³
Volume kantong lumpur	120.000.000 m ³
Luas waduk pada muka air tertinggi	± 79,23 km ²

(Sumber: Spesifikasi Alat PLTA Wonogiri).

b. Bendungan Utama (*Main Dam*)

Bendungan utama yang digunakan PLTA Wonogiri bertipe urugan batudengan inti tegak (*Rockfill central core*). Jenis urugan batu sebagian besar daribatu dan dinding yang kedap air (*impervious*). Batu yang dipakai sebagaiurugan diambil dari batu gunung yang ada disebelah barat bendungan. Dalamperencanaan bendungan perlu diadakan penyelidikan mengenai stabilitanlereng bendungan, keamanan longsor, tekanan dan tenggelamnya bahan – bahantimbunan, serta perembesan terhadap dinding kedap air. Disamping itu adabeberapa hal yang patut diperhatikan yaitu bahwa bendungan urugan batuhendaknya dihindari dari peluapan waduk.

Bendungan dibuat untuk beberapa tujuan, yaitu menaikkan permukaan air, mengarahkan aliran, dan membagi aliran. Bendungan yang dirancang atau dibangun tidaklah selalu harus dibangun secara permanen dengan pasangan batu, tetapi bisa sekedar dari susunan batu saja. Hal tersebut bergantung pada kondisi dan lokasi pembangunan bendungan dengan mempertimbangkan struktur dan bahan bendugan maka kelayakan didirikannya bendungan akan jauh lebih efektif dan baik.Data teknis bendungan dan gambar bendungan waduk dapat dilihat pada tabel 2.2 dan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Bendungan Utama
(<http://sendang-wonogiri.desa.id>)

Tabel 2.2 Data teknis bendungan utama :

Parameter Data	Satuan
Volume timbunan	1.960.000 m ³
Puncak	
Elevasi	142,0 m
Panjang Puncak	1.440 m
Kemiringan	
Hulu	1 : 3,2
Hilir	1 : 3,2

(Sumber: Spesifikasi Alat PLTA Wonogiri).

c. Terowongan Pengambil Air (*Water Way*)

Water way merupakan terowongan yang digunakan untuk mengalirkan air dari waduk. Tekanan air yang mengalir melalui *waterway* ini akan diperbesar dengan adanya perubahan penampang *water way*, yaitu mengecilkan penampang sehingga tekanan air meningkat, sehingga dapat menggerakkan turbin. *Water way* memiliki bangunan pengambilan corong berbentuk bujur sangkar horizontal berukuran 2 x 5,5 x 5,5 m³. Data teknis terowongan pengambilan air PLTA Wonogiri dapat dilihat pada tabel 2.3.

Table 2.3 Data teknis terowongan pengambilan air

Parameter Data	Satuan
Debit maksimum	75 m ³ / detik
Luas intake	30 m ²
Elevasi dasar	116,0 m
Panjang terowongan (<i>tunnel</i>)	263,62 m

(Sumber: Spesifikasi Alat PLTA Wonogiri).

d. *Power Intake*

Bangunan ini berbentuk menara beton yang terpasang diwaduk yang berfungsi sebagai fasilitas pengambilan air dari waduk yang kemudian dialirkan melalui *penstock* menuju turbin. Bangunan ini dilengkapi dengan:

- a. *Intake Struktire* yang dilengkapi *trash rack* yang berfungsi sebagai penahan kotoran dengan panjang 44,745 m.
- b. *Intake Tunnel* yang merupakan saluran utama *intake structure* dan *gate shaf* dengan panjang 75,5 m.

- c. *Gate Shaft* (Pintu Utama) berfungsi untuk menutup air yang masuk ke *water way*, apabila ada pekerjaan, perawatan dan keadaan darurat (*emergency*) pada *penstock*, *main valve* dan lain-lain. Pintu utama terletak diantara *Power Intake* dan *surge tank*. Sedang dalam pengoperasiannya dapat dilakukan secara manual maupun otomatis. Data teknis *power intake* PLTA Wonogiri dapat dilihat pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Data teknis power intake PLTA Wonogiri

Parameter Data	Satuan
Spesifikasi pintu utama	
Tinggi	5,5 m
Lebar	5,5 m
Tipe	<i>Fixed Wheel Gate Head</i>
Recana	
Level rencana	34.124 m
Elevasi ke hulu	139,100 m
Elevasi ke hilir	104,976 m
Elevasi jarak ambang	104,796 m
Kecepatan pengangkatan	
Naik	50 ton
Turun	50 ton di udara , 25 ton di air
Ketinggian pengerekan	
Normal	7 m
Penuh	38 m

(Sumber: Spesifikasi Alat PLTA Wonogiri).

e. Kolam Olakan (*Surge Tank*)

Aliran air dari waduk mengalir dari dam hingga ke bendungan PLTA sampai ke turbin. Aliran air ini akan melewati saluran air tertutup (terowongan) sampai menuju ke tabung peredam. Sebelum melewati tabung peredam aliran air akan melewati katub pengaman terlebih dahulu, kemudian diujung saluran terdapat pipa pesat yang kuat terhadap goncangan dan tekanan air. Tabung peredam (*surge tank*) berfungsi sebagai penahan dari goncangan dan tekanan air yang terjadi dalam pipa pesat. *Surge Tank* merupakan bangunan yang berbentuk bundar dengan diameter bawah 33m dan diameter atas 15m. perubahan debit air tersebut terjadi ketika *main inlet valve* ditutup.

f. Pipa Pesat (*Penstock*)

Pipa pesat atau *penstock* merupakan pipa saluran yang terletak antara *surge tank* dengan turbin. Dibagian dasar pipa pesat terdapat katub pemasuk utama yang mengatur air masuk kedalam turbin. Katub ini akan mengarahkan air menuju rumah turbin/*spiral casing* (rumah siput) didalamnya terdapat pintu pengatur air yang akan mengenai baling-baling turbin kemudian mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik roda air turbin. Saluran pipa pesat adalah saluran pengaliran air dari tabung penenang hingga keturbin dengan debit yang stabil. Besar ukuran saluran pipa pesat tergantung pada besarnya debit aliran air yang diperlukan untuk menggerakkan turbin supaya menghasilkan daya yang maksimal. Pipa pesat ini terbuat dari pipa baja yang tahan terhadap tekanan air dadakan dan maksimum, hal ini terjadi pada saat penutupan katup pemasukan utama (*Main Intake Valve*).

g. Pintu Pelimpah (*Main Spillway*)

Main Spillway atau pintu pelimpah utama yaitu sebuah pintu yang berfungsi untuk pelimpahan air ketika ketinggian air waduk telah mencapai batas yang dapat mengakibatkan banjir dan bendungan utama aman dari tekanan yang berlebihan, terdapat 4 buah saluran pelimpah air dengan tinggi pintu 7,8 m dan lebar 7,5 m. Pada setiap saluran pelimpah air, terdapat pintu baja radial yang berfungsi sebagai pintu penutup pintu. Pintu ini dibuka dengan menggunakan sepasang silinder hidrolik dan menutup oleh gaya berat sendiri, merapat kesebelah belok bawah elevasi 137 mdpl. Pintu pelimpah dapat dioperasikan secara manual maupun otomatis dibawah sensor *level* waduk. Tiap saluran pelimpah air didesain untuk melewatkan air sebesar 100 m³/ detik bila elevasi waduk 137 mdpl. Pada saat bersamaan maka kapasitas yang dikeluarkan sebesar 400 m³/ detik. Data gambar *main spillway* waduk gajah mungkur dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Main Spillway* bendungan waduk gajah mungkur
(sumber : solopos.com)

h. Emergency Spillway

Bangunan pelimpah darurat atau *emergency spillway* terletak ditanggul sebelah kanan, berfungsi dalam keadaan darurat yaitu pada saat saluran pelimpah utama tidak mampu lagi membuang air waduk berlebih. Data teknis bangunan pelimpahan darurat sebagai berikut:

- a. Tipe : Fuse plug
- b. Puncak pelimpah : ± 234 dan $\pm 234,5$ m
- c. Panjang : 176 m dan 165 m
- d. Kapasitas debit air maksimal : ± 3.500 m³/detik

i. Power House

Power House adalah gedung sentral yang berfungsi untuk melindungi mesin pembangkit dalam segala cuaca. *Power House* dapat dijadikan bengkel dan ruang kerja. Bangunan *power house* PLTA Wonogiri dibuat dari beton dengan 6 lantai, dengan 2 lantai di atas tanah dan 4 lantai di bawah tanah.

j. Draft Tube

Draft Tube adalah saluran pelepas air setelah dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Pada pembuatannya diperlukan perencanaan sedemikian rupa sehingga masalah kavitasi dapat teratasi. Bentuk *draft tube* membesar kesisi luar karena akan mengubah kembali energi kinetik *head* tekanan efektif untuk mengurangi tekanan balik.

k. Saluran Pembuangan Akhir (*Tail race*)

Saluran pembuang akhir (*tail race*) yang berada setelah *draft tube* turbin berfungsi untuk mengalirkan debit air pembuangan dari PLTA kembali ke sungai atau saluran yang berfungsi menyalurkan kembali aliran air yang telah digunakan untuk memutar turbin ke daerah aliran sungai. Saluran ini direncanakan berbentuk segi empat dari pasangan batu.

2.2.3 Generator

Generator listrik merupakan komponen pembangkit tenaga listrik yang terdiri atas komponen magnet dan kumparan yang terdapat didalamnya. Jika terjadi suatu gerakan relative antara magnet dan kumparan, maka garis-garis gaya magnet akan memotong belitan-belitan kumparan dan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Generator listrik mempunyai suatu sistem electromagnetik dan armature terdiri dari sejumlah kumparan dari konduktor berisolasi yang diletakan dalam alur (*slot*) inti besi berlaminasi.

Fungsi dari generator adalah komponen/peralatan tenaga listrik yang membangkitkan daya listrik dengan proses mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Energi mekanik diperoleh dari putaran turbin yang mempunyai poros sama, didalam generator terdapat kumparan yang terletak pada rotor dan stator yang akan menghasilkan medan magnet. Menurut hukum induksi faraday, besarnya GGL yang diinduksikan pada kumparan tergantung pada Kuat medan magnet, Banyaknya lilitan dan Kecepatan putar.

Rumus :

$$GGL = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan :

- GG = gaya gerak listrik, (V);
- dt = elemen waktu t, (s);
- B = induksi magnet, (Wb/m²)
- S = permukaan S, (m²); dan
= tanda selaku besaran vektor.

Pada PLTA wonogiri generator yang digunakan yaitu tipe generator sinkron. Karena generator sinkron 3 fasa maka keluaran listrik yang diperoleh yaitu listrik AC (arus bolak-balik). Keuntungannya yaitu daya listrik yang dihasilkan dapat disalurkan untuk jarak yang cukup jauh. Rata-rata seluruh energi listrik dibangkitkan menggunakan generator sinkron. Generator sinkron terdiri dari generator sinkron 3 fasa dan generator sinkron 1 fasa. Hal yang membedakan yaitu generator sinkron 3 fasa terdapat 3 kabel yang dialiri listrik dari generator. Sedangkan generator sinkron 1 fasa terdapat hanya 1 kabel saja yang dialiri listrik dari generator. Keunggulan dari segi efisiensi yaitu pemakaian generator sinkron 3 fase dapat memperkecil Arus dan memperkecil ukuran diameter kabel. Dilihat dari segi kapasitasnya generator sinkron terbagi atas kapasitas rendah dan kapasitas tinggi. Semakin tinggi kapasitasnya maka ukuran generator akan semakin besar dan berat tetapi jika semakin kecil kapasitasnya maka ukuran generator akan semakin kecil dan lebih ringan.

Prinsip kerja generator sinkron yaitu ketika terjadi suatu gerakan antara magnet dan kumparan didalam generator, maka garis-garis gaya magnet akan memotong belitan-belitan kumparan dan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Prinsip kerja generator sinkron 3 fasa pada dasarnya sama dengan generator sinkron satu fasa, akan tetapi pada generator sinkron tiga fasa memiliki tiga lilitan yang sama dan tiga tegangan outputnya berbeda fasa 120° pada masing – masing fasa.

Pada generator terdapat bagian rotor. rotor yang berputar terhadap stator generator akan mengakibatkan terjadinya medan magnet didalamnya sehingga menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Sekali perputaran dibagian rotor akan menghasilkan sekali perputaran perdetik artinya dalam satu putaran rotor maka menghasilkan frekuensi = 1 Hertz/detik. Sebagai contoh jika frekuensi generator = 50 Hz dan rotor berputar dalam waktu 1 menit berarti sebanyak 60 putaran per menit. Maka hasilnya yaitu $50 \times 60 = 3000$ revolution per menit (rpm) selama 1 menit putaran rotor. Pada rotor terdapat kutub-kutub, kutub ini bisa berjumlah 1 atau lebih tergantung jenis generator yang digunakan. Untuk menentukan frekuensi dari tegangan hasil induksi oleh fungsi kecepatan rotor dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$f = \frac{P}{2} \times \frac{n}{60} \text{ (Hertz)} \dots\dots\dots (2.2)$$

Ket :

f = frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub

n = jumlah putaran per menit (Rpm)

Terdapat selisih sudut sebesar 120 derajat antara belitan-belitan yang ada pada generator sinkron tiga fasa total belitan sebanyak 3 (tiga). Semua fasa dibelitan tersebut masing-masing ditandai dengan huruf u-v-w, atau r-s-t. Dari ketiga fasa tersebut bisa diatur melalui hubungan delta atau hubungan bintang. Untuk menentukan besar tegangan antara fase daya sebuah pada generator dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = V.I. \cos\phi. \sqrt{3} \dots\dots\dots (2.3)$$

Di mana:

P = daya (W); V = tegangan (V);

I = arus (A); $\cos\phi$ =Faktor daya

Berikut ini adalah bagian – bagian dari generator sinkron PLTA wonogiri adalah :

1. Rangka Stator

Rangka stator terbuat oleh bahan-bahan baja yang tahan dan kuat dalam jangka panjang, rangkaian stator ini dibuat tertanam pada bangunan *power house*. Bertujuan untuk menghindari terjadinya pergeseran saat ada getaran-getaran/gangguan yang terjadi di *power house* sehingga posisi rangkaian stator utuh dan kokoh tidak bergeser sedikitpun. Rangka stator ini berbentuk lingkaran dimana sambungan – sambungan pada rusuknya akan menjamin generator terhadap getaran – getaran. Inti stator terbuat dari bahan *ferromagnetic* atau besi lunak yang disusun berlapis – lapis sebagai tempat terbentuknya fluk magnet. Sedangkan kumparan stator tersusun dari tembaga yang disusun dalam alur – alur kumparan. Karena kumparan stator inilah terbentuknya gaya gerak listrik (GGL).

2. Inti Stator

Pada bagian stator didalamnya terdapat inti stator yang tersusun rapi berlapis-lapis seperti susunan buku-buku dan berbentuk seperti lempengan tipis berbahan baja. Pada inti stator terdapat isolasi diantara kedua inti stator tersebut dan diikat supaya lebih kuat, dipasangnya isolasi antara lempengan tersebut bertujuan agar menghindari panas dari plat-plat baja tersebut. Penyusunan inti stator disusun berlapis – lapis agar meminimalkan terjadinya rugi-rugi tegangan dan arus. Terdapat juga saluran/celah udara berfungsi sebagai pendinging keluar masuknya udara dan meminimalkan suara bising dari generator. Alur inti stator dibentuk dengan sistem buku – buku.

3. Kumparan Stator

Pada bagian ini kumparan terbuat oleh bahan-bahan tembaga yang mempunyai kualitas terbaik. Pada Kumparan terdapat kawat yang diisolasi, kemudian diikat bertujuan untuk lebih memperkokoh kedudukan posisi kumparan. Kumparan dimasukkan kesetiap alur

dengan pemanasan dan kompresi sehingga *dammar epoxy* mengisi seluruh celah – celah dua alur, selanjutnya menjadi kawat – kawat terbuka kaku dan kuat.

4. Rotor

Rotor tersusun dari lempengan plat baja pejal dengan ketebalan 6 mm. Rotor tersusun secara berlapis-lapis menyerupai susunan pada stator. Lingkaran rotor merupakan bentuk yang diatur sedemikian rupa sehingga setiap sambungan dari setiap lapisan satu persatu membentuk sebuah jaringan yang berkeliling. Inti stator dilengkapi dengan sebuah katup masing – masing dililitkan kumparan medan. Lapisan kumparan tersebut diberi sekat menggunakan isolasi bertujuan agar kuat dari suhu panas dan mampu bertahan dari kuat gerakan putaran pada rotor. serta kemampuan menahan gaya sentrifugal pada saat rotor berputar. Fungsi kumparan medan adalah untuk memperkuat medan magnet pada kutub – kutub magnet, sehingga pada rotor terjadi pemotongan flux listrik yang akan mampu menginduksikan tegangan pada stator.

5. Rumah Generator

Berfungsi sebagai pelindung bagian-bagian yang terdapat pada generator bertujuan supaya generator tidak kotor, kemasukan air, terkena debu, kemasukan benda-benda keras seperti jatuhnya mur/baut, peralatan mekanis saat perawatan generator dan lain-lainnya.

6. Poros (Shaft)

Poros atau shaft generator di kopel dengan poros turbin. Putaran kritis dari kedua poros serta seluruh bagian yang berputar sedikit 30% dari putaran maksimal putaran turbin.

PLTA Wonogiri mempunyai 2 unit Generator sinkron yang mempunyai data teknis dan gambaran seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 dan tabel 2.5.



Gambar 2.5 Generator sinkron unit 1 dan unit 2 PLTA Wonogiri.
(sumber : dokumentasi pribadi)

Tabel 2.5 Data Spesifikasi generator sinkron PLTA wonogiri.

Parameter Data	Satuan
<i>Synchronous Generator</i>	
<i>Merk</i>	<i>Shinkon Electric</i>
<i>Type & Form</i>	FENL2-AW-3700
<i>Machine No</i>	092260
<i>Output</i>	7750 kVA
<i>Phase</i>	3
<i>Voltage</i>	6600 kV
<i>Arm. Current</i>	678 A
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Poles</i>	22
<i>Speed</i>	273 rpm
<i>Power Factor</i>	0.9 lagging
<i>Rating</i>	<i>Continuous</i>
<i>Exc Voltage</i>	220 V
<i>Insul : Arm</i>	class B
<i>Fld</i>	class B
<i>Temp. Rise : Arm</i>	75oC
<i>Fld</i>	75oC
<i>Ambient Temp :</i>	40oC
<i>Flywheel effect</i>	195 t- m2
<i>Method of Colling</i>	JC 2
<i>Type of Protection</i>	JP00
<i>Standard</i>	JEC-114-3979
<i>WFG Date</i>	Apr 1983

(Sumber: Spesifikasi Alat PLTA Wonogiri).

2.2.4 Transformator

Transformator adalah kompoen peralatan pembangkit tenaga listrik yang digunakan untuk mentransformasi daya yang berfungsi untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan. Trafo memiliki ukuran yang

berbeda-beda tergantung dari penggunaannya dimana, bila trafo yang digunakan pada rangkaian elektronik berukuran kecil sedangkan untuk trafo yang sering kita jumpai di pusat-pusat pembangkit tenaga listrik berukuran besar. Transformator disuplai dari sumber listrik arus bolak-balik (AC). Jika transformator di suplai oleh arus searah (DC) maka tidak akan bekerja. Transformator terdiri atas 2 buah lilitan yaitu lilitan primer dan sekunder yang terisolasi satu sama lainnya dililitkan pada inti besi yang sama, inti besi bisa terbuat dari baja atau besi.

Pada prinsip kerjanya trafo yaitu jika lilitan primer pada trafo dialiri oleh sumber tegangan bolak-balik maka pada belitan primer akan timbul aliran arus bolak-balik. Aliran arus bolak-balik yang berada pada kumparan primer akan menghasilkan fluks magnetik bolak-balik disekitaran inti trafo. Setelah terjadinya fluks magnetik maka akan timbul induksi gaya gerak listrik (GGL) pada belitan sekunder trafo. Menurut hukum Faraday yang mengatakan bahwa apabila sebuah medan magnetik memotong belitan-belitan kumparan atau kawat penghantar maka akan menghasilkan ggl induksi. Karena fluks magnetik didalam trafo besarnya sama untuk menginduksi kedua belitan tersebut. Dengan demikian, ggl untuk kedua belitan akan sebanding dengan jumlah masing-masing lilitannya, dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

V_p = tegangan primer

V_s = tegangan sekunder

N_s = jumlah lilitan sekunder

N_p = jumlah lilitan primer

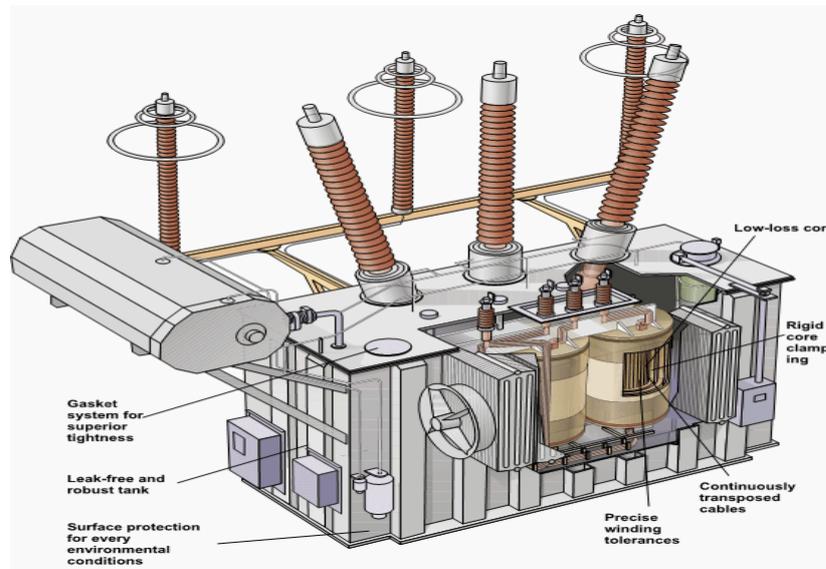
PLTA Wonogiri terdapat tiga unit transformator yang terpasang pada gardu induk yaitu Main Transformer (MTR). Fungsi dari main transformer ini sebagai *step up* tegangan dari hasil pembangkitan yang dihasilkan oleh dua unit pembangkit pada PLTA. Tegangan yang dihasilkan generator

yaitu 6,6 KV dinaikan tegangannya ke distribusi PLN menjadi 20 kV yang kemudian disalurkan ke Gardu Induk Pelem Wonogiri dan Transformator pemakaian sendiri No 1 (PS 1) serta Transformator No 2 (PS 2) yang keduanya digunakan untuk kebutuhan *power house* PLTA Wonogiri. Data teknis dan gambar transformator PLTA wonogiri dapat dilihat pada tabel 2.6 dan gambar 2.6.

Tabel 2.6 Data teknis transformator PLTA Woogiri.

Parameter Data	Satuan
Transformator Utama	
<i>Merk</i>	<i>Aichi Electric (T3-210086)</i>
<i>Current</i>	1356 A
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Phase</i>	3
<i>Cooling</i>	ONAN
<i>Output</i>	15500 kV
<i>Voltage</i>	H. V. 22000
<i>L. V</i>	6600
<i>% impedance</i>	5,73 (22000/6600 V, 75oC)
<i>Test Voltage:</i>	H. V. 150 – 50 kV
<i>L. V</i>	60 – 22 kV
<i>Temp. Rise</i>	50oC
<i>Vector Symbol</i>	Yds According to VDE 0532/L59
<i>Oil Quantity :</i>	7700 L
<i>Weight</i>	32100 kg
<i>Untaking</i>	13600 kg
<i>Serial Number</i>	820769
<i>Date</i>	1982
Transformator Pemakaian Sendiri	
<i>Merk</i>	<i>Aichi Electric (T3-210086)</i>
<i>Current</i>	21.9 A
<i>Frequency</i>	50 Hz
<i>Phase</i>	3
<i>Cooling</i>	ONAN
<i>Output</i>	250 kV
<i>Voltage</i>	H. V. TAP POS 1 : 6600 V, 21.9
<i>TAP POS 2</i>	6300 V, 22.9
<i>TAP POS 3</i>	6000 V, 24.1 A
<i>TAP POS 4</i>	5700 V, 25.3 A
<i>L.V</i>	380 Y / 220 , 380 A
<i>% impedance</i>	6,16 (75oC)
<i>Insu. Level :</i>	6 A Class – 4 kV
<i>Temp. Rise</i>	WDG 50oC
<i>OIL</i>	50oC
<i>Vector Symbol</i>	Dyll
<i>Oil Quantity</i>	530 L
<i>Weight</i>	1500 kg
<i>Serial Number</i>	820447

(Sumber: Spesifikasi Alat PLTA Wonogiri).



Gambar 2.6 Transformator
(sumber : dfliq.net)

2.2.5 Governor (Pengendali Turbin)

Governor adalah sebuah pengendali turbin yang berfungsi untuk mengatur pergerakan turbin sehingga kecepatan air dapat dikendalikan. *Governor* didesain agar putaran turbin generator konstan dalam range yang dikehendaki dengan menambah atau mengurangi debit air yang masuk ke *runner* turbin yang akan mempertahankan keseimbangan daya antara daya masukan (*power input*) dan permintaan daya (*power demand*). *Governor* bekerja bila terjadi suatu perubahan pada permintaan daya yang menyebabkan fluktuasi putaran turbin dengan generator. Turbin air seperti layaknya penggerak mula yaitu membutuhkan system pengaturan agar suatu perubahan beban tidak mengakibatkan perubahan putaran. Hal ini secara konvensional dicapai dengan pengaturan debit air yang masuk ke turbin dengan menggunakan *governor*.

PLTA Wonogiri menggunakan dua jenis jenis *governor* yaitu unit 1 menggunakan *governor* elektrik (*electrical controlled*) berupa PLC dan solenoid valve dan unit 2 menggunakan *governor* mekanis (*mechanicalcontrolled*) berupa roda gigi dan tali sling untuk pengaturan sudu turbin. Berikut adalah fungsi *governor* di PLTA Wonogiri :

1. Penggerak *gate vane*
2. Penggerak sudu *blade runner Kaplan turbine*
3. Pengendali kecepatan putar turbin

Setelah *governor* melakukan fungsinya maka parameter yang akan terlihat adalah :

1. Kecepatan turbin pada saat kondisi normal akan dipertahankan pada nominal 273 rpm sebelum kerja parallel.
2. Frekuensi akan diatur dalam keadaan kerja parallel.
3. Memperlihatkan operasi pada waktu terjadi gangguan.

Dapat dilihat pada gambar 2.7 merupakan mekanik *governor* dan *electro hydraulic governor*.



a) Mekanik Governor



b) Electro Hydraulic Governor

Gambar 2.7 Mekanik Governor dan Electro Hydraulic Governor.

2.2.6 Turbin

Turbin merupakan komponen yang terpenting dari unit PLTA. Turbin berfungsi mengubah aliran air menjadi energi kinetik yang akan memutar rotor (*runner*). Hal yang mempengaruhi jumlah daya listrik yang akan dihasilkan bergantung pada besarnya debit aliran air dan tingkat ketinggian

lokasi. Penentuan jenis atau model turbin apa yang akan digunakan tergantung pada kondisi lokasi yaitu tergantung dari debit air yang tersedia dan beda tinggi. Seluruh jenis turbin mempunyai karakteristik kemampuan yang berbeda-beda baik dari kecepatan putaran yang dihasilkan efisien atau tidak, dan kekuatan turbin tersebut. Kecepatan putaran dari turbin diukur berdasarkan beda tinggi. Dilihat dari beda tingginya, jenis turbin dapat dibagi kedalam beberapa tingkat beda ketinggian pertama, tinggi (*high head*) >30 meter, sedang (*medium head*) antara 10-30 meter, dan rendah (*low head*) di bawah <10 meter.

Turbin berfungsi untuk memanfaatkan aliran air dari pipa pesat / *penstock* untuk menghasilkan energi putar pada porosnya. Pada PLTA turbin memanfaatkan air sebagai fluida kerjanya. Air mempunyai energi potensial karena perbedaan ketinggian antara permukaan waduk (*reservoir*) dengan kedudukan turbin, energi potensial tersebut harus diubah menjadi energi kinetik (kecepatan) melalui pipa dan di dalam turbin energi kinetik tersebut diubah menjadi energi mekanik berupa putaran turbin. Pada umumnya PLTA menggunakan *Vertical Turbine* atau turbin tegak sebagai penggerak generator. Data teknis turbin dan data *rating turbin* PLTA Wonogiri dapat dilihat pada tabel 2.7 dan 2.8.

Tabel 2.7 Data teknis turbin PLTA Wonogiri

Parameter Data	Satuan
Jumlah	2 unit
<i>Merk</i>	Ebara
Tipe	<i>Vertical shaft Kaplan</i>
<i>Rated speed</i>	273 rpm
<i>Runaway speed</i>	765 rpm
<i>Serial number</i>	RA10138-01
<i>Date</i>	1982

(Sumber: Spesifikasi Alat PLTA Wonogiri).

Tabel 2.8 *Rating turbin* PLTA Wonogiri

Parameter Data	Satuan		
	<i>Effective Head</i>	<i>Output</i>	<i>Discharge</i>
<i>Maximum</i>	25.5 m	6500 kW	28.43 m ³ / detik
<i>Rated</i>	20.4 m	6500 kW	36.70 m ³ / detik
<i>Minimum</i>	15.2 m	3700 kW	28.35 m ³ / detik

(Sumber: Spesifikasi Alat PLTA Wonogiri).

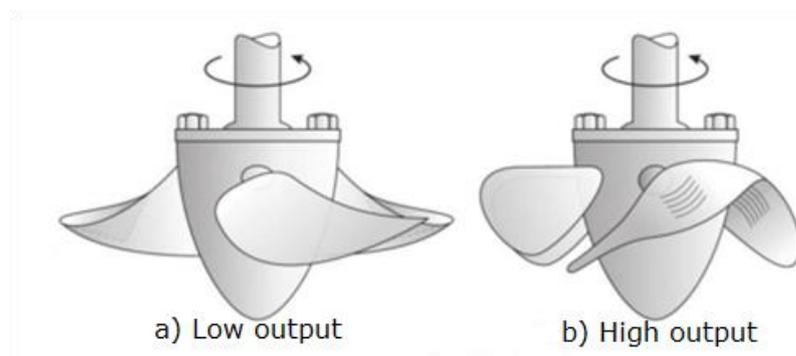
Jenis turbin yang digunakan PLTA Wonogiri adalah jenis turbin kaplan, jenis ini termasuk jenis turbin air reaksi jenis baling – baling (*propeller*). Keistimewaan dari turbin kaplan adalah sudut geraknya (*runner*) bisa diatur (*adjustable blade*) untuk menyesuaikan dengan kondisi aliran air karena perubahan debit. Turbin kaplan memiliki spesifikasi kecepatan tinggi dan bekerja pada kondisi *head* rendah dan debit besar. Karena sudut jalan turbin air dapat diputar didalam leher poros, sehingga pada perubahan tinggi jauh dan kapasitas air besar efisiensinya tinggi. Poros turbin PLTA Wonogiri merupakan poros tegak (vertikal) dan putaran turbin searah jarum jam. Untuk mengarahkan air ke turbin maka diperlukan rumah turbin berbentuk *spiral casing* (rumah siput).

a. Jenis-Jenis Turbin

Dilihat dari cara mengubah energinya turbin air dapat dibedakan menjadi 3 jenis turbin. Berikut 3 jenis turbinnya antara lain :

1. Turbin Kipas/Kaplan

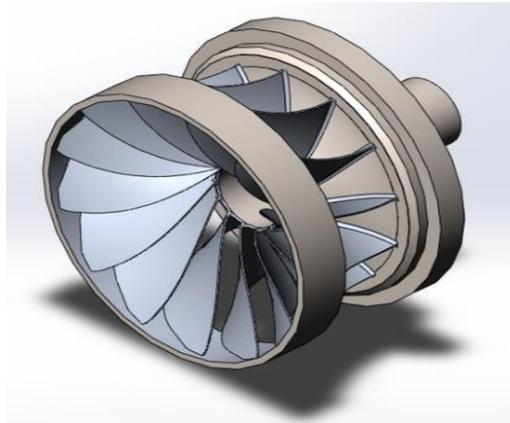
Jenis turbin ini tergolong ke jenis turbin reaksi. Turbin ini biasanya dipakai/difungsikan pada ketinggian berkisar <20 meter kebawah. Turbin kaplan akan berputar ketika proses pemanfaatan dari kecepatan debit air yang menabrak baling-baling turbin. Data gambar turbin Kaplan dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Bentuk *Runner* dari Turbin reaksi (Kaplan).
(sumber : fmc-nitk.vlabs.ac.in)

2. Turbin Francis

Jenis turbin ini tergolong ke jenis turbin reaksi sama seperti turbin kaplan. Turbin ini biasanya dipakai/difungsikan pada ketinggian berkisar 200-400m. Turbin francis akan berputar ketika proses pemanfaatan dari kecepatan debit air yang menabrak baling-baling turbin. Data gambar turbin Francis dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Bentuk *Runner* dari Turbin reaksi (Francis).
(sumber : grabcad.com)

3. Turbin Pelton

Jenis turbin ini tergolong ke jenis turbin impulse, berbeda dengan turbin Kaplan dan turbin francis. Turbin ini biasanya dipakai/difungsikan pada ketinggian berkisar $> 300\text{m}$ keatas. Turbin pelton akan berputar ketika proses impulse yang memanfaatkan kecepatan debit air kemudian menabrak baling-baling turbin. Turbin implus akan mengubah semua energi air menjadi energi potensial disertai tekanan dan kecepatan yang dijadikan ke energi kinetik yang digunakan untuk memutar turbin menjadi energi gerak/putar. Dibawah ini merupakan data gambar turbin pelton dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Bentuk *Runner* dari Turbin impulse (Pelton).
(sumber : green-mechanic.com)

Berdasarkan nilai tinggi (H) dan debit (Q) tertentu, ditentukan oleh nilai putaran spesifiknya maka dapat dipilih turbin sesuai dengan kinerjanya pada efisiensi maksimal. Turbin Francis dan propeller dioperasikan pada tinggi air jatuh yang rendah dibandingkan turbin Pelton yang digunakan pada tinggi air yang tinggi. Berikut dapat dilihat pada tabel 2.9 Jenis turbin dan putaran spesifiknya.

Tabel 2.9 Jenis Turbin dan Spesifikasinya

Jenis Turbin	Putaran spesifik (rpm)	Efisiensi (%)	Tinggi air jatuh (H)
Impuls (Pelton)	1 – 4	85 – 90	6000 – 2000
	4	90	2000
	4 - 7	90-82	2000 - 400
Francis	10 – 30	90 – 94	500
	30 – 82	94	500 – 70
	82 - 90	94 - 93	70 - 45
Propeler/Kaplan	100 -140	94	100 – 15
	140 - 250	94 - 85	15 - 10

(Sumber: erepo.unud.ac.id)

Berdasarkan hubungan putaran pada turbin (N) dan putaran spesifik turbin (Ns) terhadap jumlah *turbine blades*/sudu turbin ialah semakin tinggi suatu putaran kincir pada turbin maka jumlah *turbine blades*/sudu turbin akan berjumlah sedikit, sebaliknya jika jumlah

turbine blades semakin banyak maka putaran kincir pada turbin akan semakin rendah. Berikut ini data hubungan antara putaran dan jumlah *turbine blades*/sudu turbin dicantumkan pada tabel 2.10 dibawah ini.

Tabel 2.10 Hubungan antara putaran turbin dan putaran spesifik turbin terhadap jumlah *turbine blades*/sudu.

N (putaran kincir) Rpm	Z (jumlah turbine blades/sudu) buah	N _s (N _s putaran spesifik)
40 - 60	9	≤ 20
69 - 180	8	20 ± 45
180 - 350	6	45 ± 75
350 - 580	5	75 ± 150
*(N _s merupakan putaran yang mampu menghasilkan 1HP per head (ft))		

(Sumber: erepo.unud.ac.id)

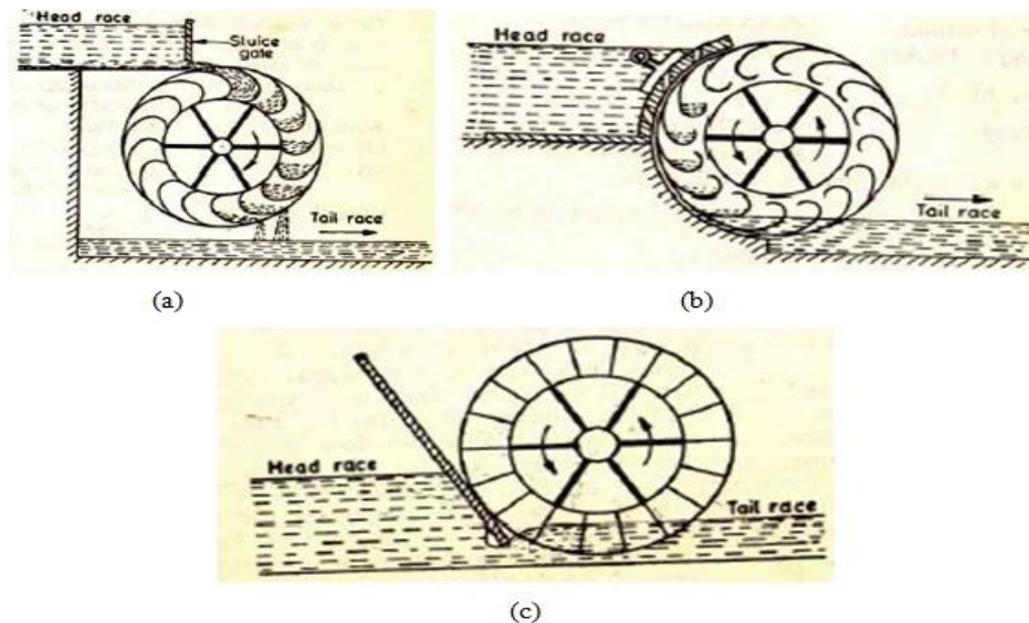
b. Jenis-jenis Kincir Turbin Air

Berdasarkan tenaga pendorong dari aliran air yaitu dimana air akan mendorong kincir turbin hingga turbin berputar setelah dorongan aliran air yang menabrak *turbine blades*/sudu turbin. Dapat dilihat pada gambar 2.11 merupakan aliran pendorong air pada kincir turbin air. Berikut penjelasan jenis-jenis aliran pendorong air pada kincir turbin air.

1. Tipe pendorong *Overshot Water Wheel* terlihat pada gambar 2.11 gambar (a), merupakan jenis pendorong air melewati bagian atas kincir turbin yang kemudian menabrak *turbine blades*/sudu sehingga kincir turbin berputar. Kincir yang berputar dikarenakan keseluruhan diakibatkan oleh berat air yang menabrak sisi atas kincir.
2. Tipe pendorong *Breast Water Wheel* terlihat pada gambar 2.11 gambar (b), merupakan jenis pendorong air melewati bagian tengah-tengah kincir turbin yang kemudian menabrak *turbine blades*/sudu sehingga kincir turbin berputar. Kincir yang berputar dikarenakan sebagian diakibatkan oleh berat air dan impuls air yang menabrak sisi bagian tengah-tengah kincir.
3. Tipe pendorong *Undershot Water Wheel* terlihat pada gambar 2.11 gambar (c), merupakan jenis pendorong air melewati bagian bawah kincir turbin yang kemudian menabrak *turbine blades*/sudu sehingga

kincir turbin berputar. Kincir yang berputar dikarenakan keseluruhan diakibatkan oleh gaya impuls air yang menabrak sisi bagian bawah kincir.

Dibawah ini merupakan gambaran dari beberapa jenis-jenis pendorong aliran air untuk memutar kincir pada turbin air ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Aliran pendorong air pada turbin air.
(sumber: teknikmesin.org/jenis-jenis-water-wheels-kincir-air/)

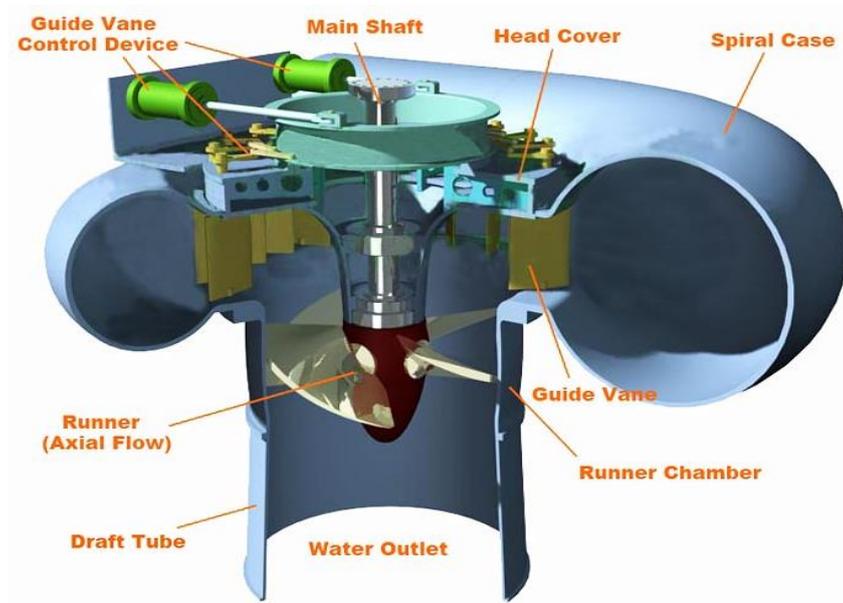
c. Bagian-Bagian Utama Turbin

Turbin air yang digunakan pada unit pembangkit PLTA Wonogiri yaitu tipe turbin air *shaf Kaplan*/propeller. Jenis turbin ini tergolong ke jenis turbin reaksi. Turbin ini biasanya dipakai/difungsikan pada ketinggian berkisar <20 meter kebawah. Proses untuk memutar turbin terjadi dari energi potensial air yaitu air pada dam/waduk yang memiliki ketinggian dan debit tertentu yang berubah menjadi energi kinetik air berupa air yang memiliki kecepatan dengan memanfaatkan *head* (perbedaan ketinggian air pada waduk dengan ketinggian air pada *tailrace*) dengan mengalirkan melewati pipa *penstock* menjadi energi mekanik air yang akan menabrak *runner* turbin sehingga turbin berputar. Bagian-

bagian utama turbin akan ditunjukkan pada gambar 2.12. Berikut ini penjelasan dari bagian-bagian utama turbin Turbin *Kaplan/propeller* sebagai berikut:

1. *Spiral Casing* (Rumah Siput) merupakan bagian komponen utama turbin yang berbentuk *spiral* melingkar seperti rumah siput dengan lubang pipa depan besar semakin keujung lubang pipa alirannya mengecil. Terbuat dari bahan baja tebal dan kuat yang melingkari turbin *blades*. Berbentuk *spiral case* tujuannya agar air yang masuk untuk mengalir turbin menjadi merata sehingga efisiensi turbin terjaga.
2. *Guide Vane*(Sudu Pengarah) merupakan bagian komponen utama turbin yang berbentuk seperti pintu-pintu yang tersusun melingkar mengikuti alur *spiral case* berfungsi sebagai pengarah masuknya aliran air menuju *runner blades*. Tujuannya agar air yang masuk ke *runner blades* menjadi sama rata dan konstan. Untuk mengatur bukaan pintu *guide vane* agar air yang masuk merata maka bisa diatur melalui *governor* (pengendali turbin) yang memiliki beberapa fungsi seperti penggerak *gate vane*, penggerak sudu *blade runner kaplan turbine*, dan pengendali kecepatan putar turbin.
3. *Runner* (Sudu Gerak) merupakan bagian komponen utama turbin yang berbentuk seperti baling-baling kipas/*propeller*. Runner disebut sebagai rotor penggerak turbin pada *runner* terdapat *blades/sudu*, banyaknya sudu pada *runner* akan menentukan kecepatan pada putaran turbin.
4. *Main shaf* (Bantalan Utama) merupakan bagian komponen utama turbin yang berfungsi sebagai bantalan penahan dari guncangan dan getaran saat turbin beroperasi.
5. *Draft Tube* (Saluran Pelepas) adalah saluran pelepas air setelah dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin. Pada pembuatannya diperlukan perencanaan sedemikian rupa sehingga masalah kavitasi dapat teratasi. Bentuk *draft tube* membesar kesisi luar karena akan

mengubah kembali energi kinetik *head* tekanan efektif untuk mengurangi tekanan balik.



Gambar 2.12 Bagian-bagian Utama Turbin *Kaplan/propeller*.
(sumber: <http://www.eternohydro.com/turbines/axial-flow-turbines.html>)

d. Gejala Turbin Air

Ada beberapa gejala yang bisa menyebabkan kerusakan pada turbin dan menurunkan kinerja/efisiensi pada mesin turbin, berikut ini beberapa gejala pada turbin air sebagai berikut :

1. Kavitasasi Turbin

Kavitasasi turbin yaitu suatu kejadian dimana terjadinya penurunan tekanan pada aliran fluida yang mengakibatkan tekanan fluida berada dibawah tekanan uap jenuh sehingga menimbulkan gelembung-gelembung air yang diakibatkan zat cair yang menguap. Hal ini bisa terjadi dikarenakan tekanan yang rendah dan naiknya temperature tekanan yang terjadi pada pompa, sudu pompa maupun saluran pipa yang menuju turbin. Jika kavitasasi terjadi maka bagian *turbin blades* dan *casing* akan menimbulkan lubang-lubang kecil bahkan menyebabkan korosi sehingga menurunkan kinerja dari turbin. Pada PLTA Wonogiri

untuk mengetahui ukuran akan terjadinya kavitasi dapat dilihat pada nilai besar kecilnya delta H yang terukur pada hasil laporan pembangkitan PLTA. Delta H yaitu proses perubahan suatu reaksi kimia yang terjadi pada suatu sistem tertentu, misalkan dari perubahan zat cair ke gas, karena delta H positif maka air mendapatkan panas, tetapi jika perubahan air ke padat delta H negatif air kehilangan panas. Jadi besarnya nilai delta H akan mempengaruhi besar kecilnya kinerja dari turbin semakin kecil nilai delta H maka semakin tinggi untuk unjuk kerja turbin, sebaliknya jika delta H semakin besar maka unjuk kerja akan semakin menurun.

2. Kecepatan Liar

Suatu kejadian dimana beban yang dihentikan secara tiba-tiba pada saat turbin masih bekerja/beroperasi sehingga menimbulkan kecepatan liar pada turbin. Hal ini bisa terjadi dikarenakan kinerja dari *governor* tidak optimal atau bahkan *governor* dalam keadaan rusak sehingga tidak ada pengendalian dari putaran roda turbin yang menimbulkan putaran liar diluar kendali turbin tersebut. Kecepatan liar pada turbin harus diperhitungkan agar mencegah terjadinya kerusakan pada turbin dan generator.

3. *Water Hammer* (Pukulan Air)

Water hammer terjadi karena adanya aliran air yang berubah arah aliran dan tekanan pada fluida terhenti secara tiba-tiba sehingga terjadi suara menimpa/pukulan air yang menimpa turbin yang bisa menyebabkan kerusakan pada mesin turbin. Untuk menghindari terjadinya pukulan air kejut maka dibuatnya tabung peredam yaitu *surge tank*. Tabung peredam (*surge tank*) berfungsi sebagai penahan dari guncangan dan tekanan air yang terjadi dalam pipa pesat menuju turbin.

2.2.7 Energi Potensial

Suatu keadaan dimana benda dalam posisi diam pada tempatnya yang memiliki energi potensial akibat pengaruh dari tempatnya atau kedudukannya. Pada proses pembangkitan pada PLTA terdapat energi potensial air, energi potensial air berupa kedudukan dam/waduk yang memiliki ketinggian dan debit tertentu. Energi potensial dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_p = m \cdot g \cdot h \quad \text{atau} \quad E_p = m \cdot g \cdot \Delta z \dots \dots \dots (2.5)$$

Ket :

E_p = Energi potensial (joule).

h = Ketinggian (m).

m = Massa benda (kg).

Δz = Beda ketinggian (m).

g = Percepatan gravitasi (m/)

Untuk menentukan laju aliran massa air ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$m = Q \cdot \rho \dots \dots \dots (2.6)$$

Ket:

m = Massa benda (kg).

ρ = Berat jenis air (1.000 kg/m³)

Q = Kapasitas air (m³/s)

2.2.8 Energi Kinetik

Suatu keadaan dimana benda dalam posisi bergerak dari tempatnya yang memiliki energi kinetik yang dipengaruhi oleh kecepatan dan berat benda/masa benda itu sendiri. Pada proses pembangkitan pada PLTA terdapat energi kinetik air, yaitu air yang memiliki kecepatan dengan memanfaatkan *head* (perbedaan ketinggian air pada waduk dengan ketinggian air pada *tailrace*) dengan mengalirkan melewati *penstock*. Energi kinetik dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \dots \dots \dots (2.7)$$

Ket:

E_k = Energi kinetik (joule). m = Massa benda (kg).

v = Kecepatan (m/dt).

2.2.9 Hukum Kekekalan Energi

Suatu energi yang tidak dapat dibuat/diciptakan maupun dihilangkan tetapi energi tersebut dapat berubah dari bentuk yang satu ke bentuk yang lainnya tanpa merubah besarnya jumlah energi secara keseluruhan. Hukum kekekalan energi memiliki persamaan sebagai berikut:

$$E_m = E_p = E_k \dots\dots\dots(2.8)$$

Ket :

E_m = Energi mekanik (joule) E_p = Energi potensial (joule).

E_k = Energi kinetik (joule).

2.2.10 Daya Turbin

Daya turbin merupakan jumlah daya yang dihasilkan dalam satuan detik hasil dari kinerja suatu turbin yang dilakukan oleh berat air/masa jenis air, serta pengaruh dari gravitasi bumi, dan pengaruh pergerakan air jatuh pada ketinggian head sampai ke daerah terendah dimana turbin itu dipasang. Sedangkan kecepatan dari debit air yang mengalir akan menghasilkan suatu gaya yang kemudian menggerakkan kincir turbin sehingga turbin berputar. Daya yang diperoleh dengan efisiensi turbin tertentu dapat ditentukan dengan rumus persamaan sebagai berikut:

$$\text{Daya Turbin } (P_t) = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_T \dots\dots\dots(2.9)$$

Ket :

P_T = Daya turbin (Watt)

ρ = Berat jenis air (1.000 kg/m³)

Q = Kapasitas air (m³/s)

H = Tinggi air jatuh (head,m)

η_T = Efisiensi turbin.

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

Untuk menentukan daya yang dimiliki oleh air bisa digunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_w = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \dots\dots\dots(2.10)$$

Ket :

P_w = Daya yang dimiliki air. 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)

2.2.11 Efisiensi Turbin

PLTA wonogiri memiliki 2 unit mesin turbin bertipe turbin kaplan/*propeller* dengan sudu bisa diatur. Rata-rata nilai efisiensi mesin turbin pada PLTA wonogiri dengan kisaran nilai efisiensi tertinggi sebesar 80 –95% nilai ini sudah jauh dari nilai efisiensi 50%. Menurut Pak Aris Widihatmaka (Pelaksana Senior Teknisi Listrik dan Kontrol) PLTA Wonogiri nilai efisiensi dikatakan baik bila berada diatas 50%, dan efisiensi dibawah 50% kerja turbin tidak baik/tidak optimal. Efisiensi turbin merupakan suatu ukuran unjuk kerja/performa suatu mesin turbin untuk menghasilkan suatu daya dimana perbandingannya daya yang dihasilkan dengan kinerja mesin turbin. Maka dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Turbin } (\eta_T) = \frac{P_t}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H} \dots\dots\dots(2.11)$$

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 Wonogiri tinggi air jatuh (head) dapat dicarikan dengan persamaan yaitu:

$$H = \text{Elevasi } \textit{Intake} \text{ (mdpl)} - \text{Elevasi } \textit{Tailrace} \text{ (mdpl)} \dots\dots\dots(2.12)$$

Nilai suatu efisiensi turbin akan selalu berubah-ubah tergantung oleh jenis turbin yang digunakan dan keadaan beban pada turbin. dapat dinyatakan bahwa dalam beberapa keadaan seperti tinggi terjun maksimum, tinggi terjun normal, tinggi terjun minimum dan tinggi terjun rancangan dapat menentukan hasil kinerja dari turbin itu sendiri. Pada tabel 2.11 dibawah ini akan menggambarkan jenis turbin dan keadaan beban untuk menentukan kisaran nilai efisiensi turbin

Tabel 2.11 Jenis Turbin dan Keadaan Beban Untuk Menentukan Kisaran Nilai Efisiensi Turbin.

Jenis Turbin	N _s (rpm)	% Efisiensi pada beberapa keadaan beban					% beban pada Efisiensi Maximum
		0.25	0.50	0.75	1.00	max	
Impuls (pelton)	22	81	86	87	85	87.1	70
Francis	75	62	83	88	83	88	75
Francis	110	60	85	90	84	90.2	80
Francis	220	59	83	90	85	91.5	85
Francis	335	54	82	91	86	91.0	87.5
Francis	410	47	71.5	85	87	91.5	92.5
Francis	460	55	74.5	86.5	86	92.5	92
Propeller (sudu tetap)	690	45	70	84.5	82	91.5	92
Propeller (sudu tetap)	800	32	59	78	84	88	96
Propeller (sudu dpt diatur)	750	83.5	91.5	91.5	87	91.6	70

(sumber : Diklat Kuliah Banguan Tenaga Air: Djoko Luknanto)

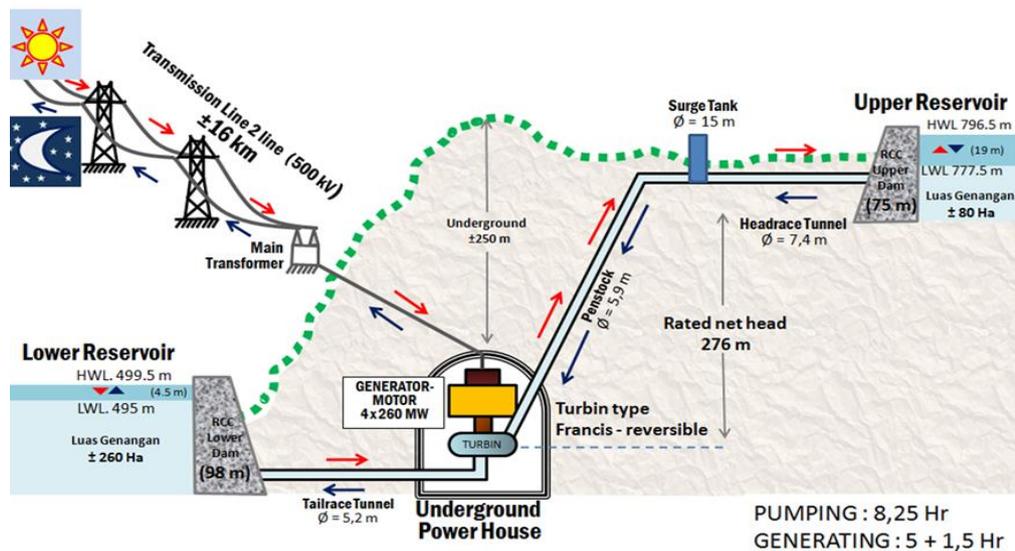
2.2.12 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

PLTA Wonogiri memanfaatkan air dari Waduk Gajah Mungkur sebagaipenggerak utama. Dalam pengoperasian unit diperlukan syarat ketinggian airminimal elevasi pada *intake* yaitu 130,00 mdpl. Prinsip kerja PLTA yaitu air sungai yang sudah tertampung atau tersimpan dari waduk/kolam tandon dialirkan melalui terowongan air atau melalui pipa *penstock*bertujuan untuk memperbesar tekanan air tersebut. Sebelum masuk ke *penstock* air dari waduk masuk melalui dam kemudian diteruskan melalui pintu *control* atau *power intake* yang berfungsi sebagai membuka dan menutup air yag masuk keterowongan air.

Setelah air dialirkan keterowongan maka akan masuk ke tabung peredam (*surge tank*) tujuannya meredam tekanan mendadak dari pukulan air. Setelah kondisi debit air stabil didalam tabung peredam maka akan

dialirkan ke pipa pesat atau *penstock*. Pada bagian dasar pipa tersebut terdapat katup yang akan mengatur air menuju rumah turbin. Aliran air akan masuk kerumah turbin yang disebut *spiral casing* (rumah siput). Didalam rumah turbin terdapat pintu-pintu pengatur air yang akan menabrak baling-baling turbin yang mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik. Selanjut energi mekanik akan menggerakkan generator listrik yang kemudian berubah menjadi energi listrik.

Energi listrik dari generator akan di transferkan ke transformator, pada transformator energi listrik akan diatur baik itu dinaikan tegangannya maupun di turunkan tegangannya. Energi listrik yang dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga air ini kemudian disalurkan ke konsumen atau ke gardu induk lainnya melalui saluran transmisi dan distribusi sistem tenaga listrik. Dibawah ini merupakan gambaran dari prinsip kerja PLTA Wonogiri ditunjukkan pada gambar 2.13 gambaran prinsip kerja dari PLTA Wonogiri.



Gambar 2.13 Prinsip kerja PLTA (sumber : <https://jabartoday.com>)

2.2.13 NCF (Net Capacity Factor)

NCF (*Net Capacity Factor*) merupakan faktor kapasitas pembangkitan tiap unit pembangkit. Besarnya nilai pemanfaatan energi unit pembangkit dalam periode tertentu yang diamati dari kemampuan produksi dapat dilihat

dari NCF dan nilai CF. Dimana NCF (*Net Capacity Factor*) adalah perbandingan antara total produksi netto (setelah dikurangkan dengan daya pemakaian sendiri) dengan daya mampu netto unit pembangkit dikali dengan jam periode tertentu, sedangkan CF (*Capacity Factor*) adalah perbandingan antara total produksi bruto dengan daya mampu netto dikali dengan jam periode tertentu.

NCF dan CF menunjukkan pemanfaatan energi unit pembangkit dalam periode tertentu yang diamati dari kemampuan produksi. Semakin tinggi nilai NCF dan CF (100%) maka semakin baik kinerja unit pembangkit. Namun standar nilai NCF tahunan PLN untuk pembangkit tenaga air yakni antara 30-50%, nilai CF rata-rata diatas 50% yang berarti memenuhi standar di setiap tahunnya hal ini berkaitan dengan ketersediaan air sebagai sumber penggerak pembangkit listrik tenaga air yang mengalami perubahan musim penghujan dan kemarau di Indonesia. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada rumus berikut ini :

$$NCF = \frac{\text{Produksi Netto}}{\text{Daya Mampu Netto} \times \text{Period Hours}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.13)$$

$$CF = \frac{\text{Produksi Bruto}}{\text{Daya Mampu Netto} \times \text{Period Hours}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.14)$$

keterangan :

- a. Produksi bruto merupakan total produksi energi listrik dalam satuan kWh atau MWh.
- b. Produksi netto merupakan produksi energi listrik dalam satuan kWh atau MWh yang disalurkan ke Sistem Penyaluran dengan perhitungan Produksi bruto dikurangi energi Peamakaian Sendiri (PS).
- c. PH (*Period Hours*) merupakan jumlah jam tersedia dalam suatu periode tertentu yang sedang diamati selama unit dalam status aktif (misalkan periode yang diamati adalah 1 bulan dan terdapat 30 hari dalam 1 bulan, maka PH = 30 x 24 jam = 720 jam).