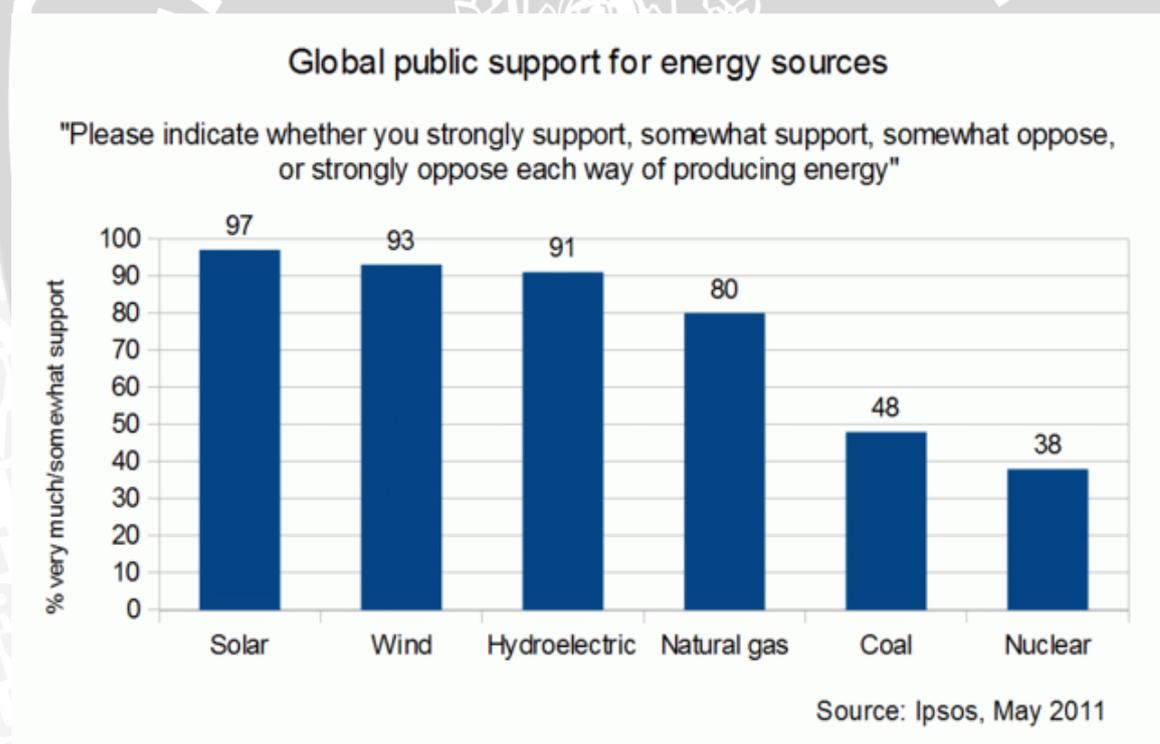


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Umum

Air yang mengalir dengan kapasitas debit tertentu melalui sungai maupun dalam bentuk limpasan permukaan memiliki potensi untuk dikonversi menjadi sebuah sumber energi. Energi yang dihasilkan dari pemanfaatan debit air ini sangat tergantung terhadap besarnya debit dan ketinggian jatuh dari air itu sendiri dan secara praktis hal ini dikembangkan menjadi suatu rekayasa teknik yang bisa disebut sebagai pembangkit listrik tenaga air.

Pembangkit listrik tenaga air merupakan salah satu dari tipe pembangkit listrik yang ada di dunia dan merupakan salah satu tipe pembangkit yang menggunakan sumber energi yang terbarukan (*renewable energy*) dan merupakan tipe pembangkit energi yang tingkat pengembangannya lebih matang daripada tipe pembangkit energi dengan sumber energi lain di dunia.



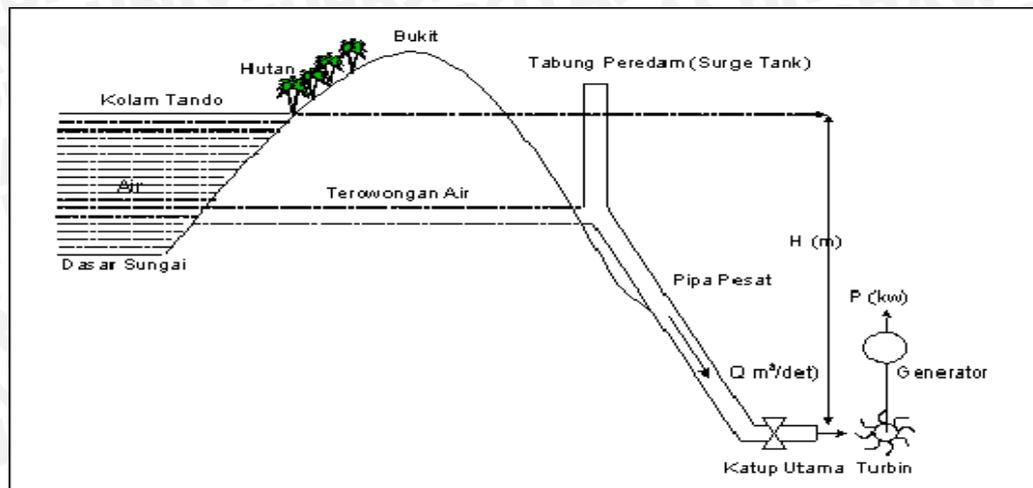
**Gambar 2.1 Pengembangan Pembangkit Energi Dengan Sumber Energi Terbarukan**

Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/renewable\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/renewable_energy)

Sistem pembangkit tenaga air memiliki sistem yang sangat sederhana dimana air dengan debit tertentu disalurkan dari sumber air menuju ke turbin air dimana energi kinetik dikonversikan menjadi energi mekanik dan energi mekanik dikonversi melalui



sebuah generator menjadi sebuah energi listrik dan didistribusikan melalui grid menuju jaringan distribusi listrik.



**Gambar 2.2 Skema Konversi Energi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air.**

Sumber: <http://www.Affrins.blogspot.com/2011/11/investasi>

PLTA memiliki tiga komponen utama yaitu air (sumber energi), turbin dan generator. Prinsip kerja PLTA yang paling utama adalah memanfaatkan semaksimal mungkin energi air yang dapat ditangkap oleh peralatan utamanya yang disebut turbinair. Besarnya daya yang dihasilkan oleh PLTA tergantung dari besarnya *head* dan debit air. Yang dimaksud dengan *head* adalah tinggi jatuh sedangkan debit air adalah debit outflow pada intake.

## 2.2. Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga Air

Klasifikasi pembangkit listrik tenaga air dapat dibedakan menjadi lima jenis berdasarkan masing-masing parameter, antara lain (Patty, 1995) :

### 1. Pembagian Secara Teknis

PLTA dilihat secara teknis dapat dibagi atas :

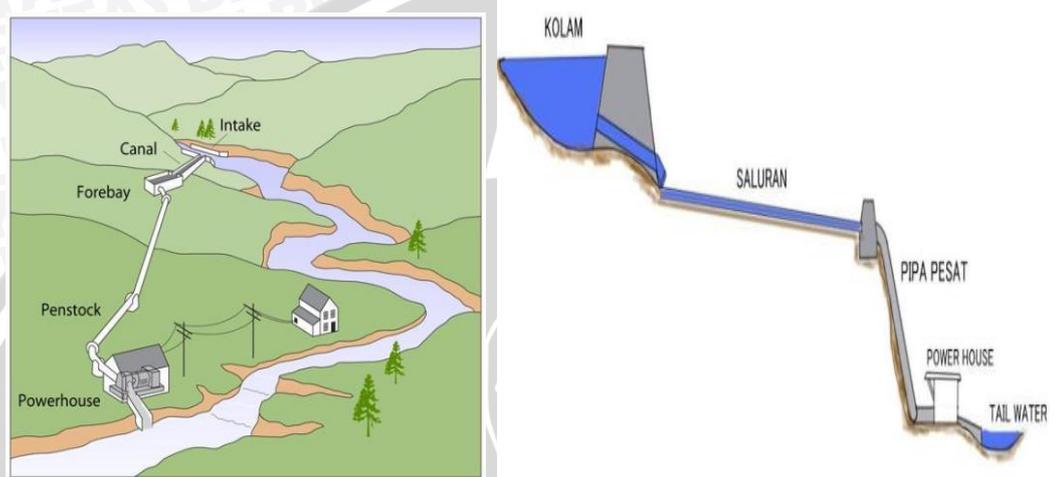
- PLTA yang menggunakan air sungai atau air waduk.
- PLTA yang menggunakan air yang telah dipompa ke suatu reservoir yang diletakan lebih tinggi.
- PLTA yang menggunakan pasang surut air laut.
- PLTA yang menggunakan energi ombak.

Ditinjau dari cara membendung air, PLTA dapat dikategorikan menjadi dua macam:

- PLTA *run of river* yaitu air sungai di hulu dibelokkan dengan menggunakan dam yang dibangun memotong air sungai, air sungai

kemudian diarahkan ke bangunan PLTA kemudian dikembalikan ke aliran semula di hilir.

- b. PLTA dengan Bendungan (*DAM*) yaitu yaitu aliran air sungai dibendung dengan menggunakan bendungan yang besar agar diperoleh jumlah air yang sangat besar dalam kolam tandon kemudian baru air dialirkan ke PLTA. Air di sini dapat diatur pemanfaatannya misalnya mengenai debit air yang digunakan dalam pembangkitan dapat diatur besarnya.



**Gambar 2.3 PLTA *Run of River* (kiri) dan PLTA Kolam Tandon (kanan)**

Sumber: [http://www.internationalrivers.org/files/styles/600-height/public/images/blog\\_entry/katy\\_yan/hydro\\_types.jpg?itok=R18AeEDd](http://www.internationalrivers.org/files/styles/600-height/public/images/blog_entry/katy_yan/hydro_types.jpg?itok=R18AeEDd)

## 2. Pembagian Menurut Kapasitas

- a. PLTA mikro yaitu dengan daya 99 kW.
- b. PLTA kapasitas rendah yaitu dengan daya 100 sampai 999 kW.
- c. PLTA kapasitas sedang yaitu dengan daya 1000 sampai 9999 kW.
- d. PLTA kapasitas tinggi dengan daya diatas 10.000 kW.

## 3. Pembagian Menurut Tinggi Jatuh Air

- a. PLTA dengan Tekanan rendah;  $H < 15$  m
- b. PLTA dengan tekanan sedang;  $H = 15$  hingga 50 m
- c. PLTA dengan tekanan tinggi;  $H = 50$  m.

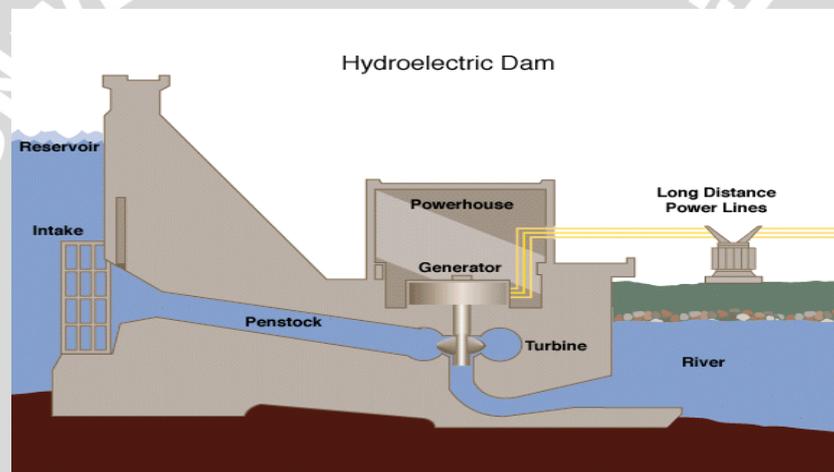
## 4. Pembagian Berdasarkan Ekonomi

- a. PLTA yang bekerja sendiri. Jadi tidak dihubungkan dengan sentral-sentral listrik yang lain.
- b. PLTA yang bekerjasama dengan sentral-sentral listrik yang lain dalam pemberian listrik kepada konsumen. Sehubungan dengan ini PLTA dapat dipakai untuk:

- Beban dasar; PLTA bekerja terus-menerus
- Beban maksimum; PLTA bekerja pada jam-jam tertentu.

### 2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) adalah pembangkit yang mengandalkan energi potensial dan kinetik dan air untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan ini biasa disebut sebagai hidroelektrik. Bentuk utama dari pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang dihubungkan ke turbin yang digerakan oleh tenaga dari air. Namun, secara luas, pembangkit listrik tenaga air tidak hanya terbatas pada air dan sebuah waduk atau air terjun, melainkan juga meliputi pembangkit listrik yang menggunakan tenaga air dalam bentuk lain seperti tenaga ombak.



**Gambar 2.4 Potongan Melintang Bendungan di PLTA**

Sumber : [http://id.wikipedia.org/wiki/Pembangkit\\_listrik\\_tenaga\\_air](http://id.wikipedia.org/wiki/Pembangkit_listrik_tenaga_air)

### 2.4. Sistem Operasi Waduk

Tergantung dari kebutuhannya, maka lingkup waktu dari simulasi mencakup 1 tahun operasi atau lebih. Salah satu operasi dibagi-bagi menjadi sejumlah periode, misalnya bulanan, 15 harian, 10 harian, mingguan, maupun harian. Persamaan umum simulasi operasi waduk adalah Neraca Keseimbangan Air (water balance).

Aturan umum dalam simulasi waduk adalah:

1. Air waduk tidak boleh turun di bawah tampungan aktif. Dalam banyak keadaan, maka batas bawah tampungan aktif ini ditentukan oleh tingginya lubang *outlet* waduk.

2. Air waduk tidak dapat melebihi batas atas tampungan aktif. Dalam banyak keadaan maka batas atas tampungan aktif ini ditentukan oleh puncak spillway. Apabila terjadi kelebihan air, maka kelebihan ini akan melimpah (spillover).
3. Ada beberapa waduk (waduk multiguna) yang memiliki batasan debit yang dikeluarkan (outflow), baik debit maksimum atau debit minimum.

#### 2.4.1. Simulasi Operasi Waduk Untuk PLTA

Dalam simulasi pola operasi waduk untuk PLTA digunakan konsep beban puncak yaitu dengan mengalihkan debit dasar ke debit puncak dengan tujuan agar distribusi listrik lebih efisien dan efektif.

Operasi waduk yang diterapkan dalam studi ini adalah :

Operasi waduk pada PLTA dioperasikan untuk keadaan sebagai berikut :

- a. Operasi beban puncak dengan lama waktu operasi standard dalam satu hari selama 5 jam, mulai dari jam 17.00 – 22.00.
- b. Operasi beban dasar dengan lama waktu operasi standard dalam satu hari selama 19 jam, mulai dari jam 23.00 – 16.00, jika terdapat debit lebih dari pemakaian operasi beban puncak.

Konsep dasar operasi waduk harian untuk operasi beban dasar dan beban puncak pada dasarnya adalah mengacu pada persamaan kontinuitas massa aliran dalam satu hari, dengan pendekatan simulasi analisa perilaku (*behavior analysis*), dengan persamaan sebagai berikut :

$$S_{t+1} = S_t + I_t - O_t - L_t \quad (2-1)$$

$$C \geq S_t \geq 0 \quad (2-2)$$

dimana :

$S_{t+1}$  = Tampungan waduk pada waktu t+1

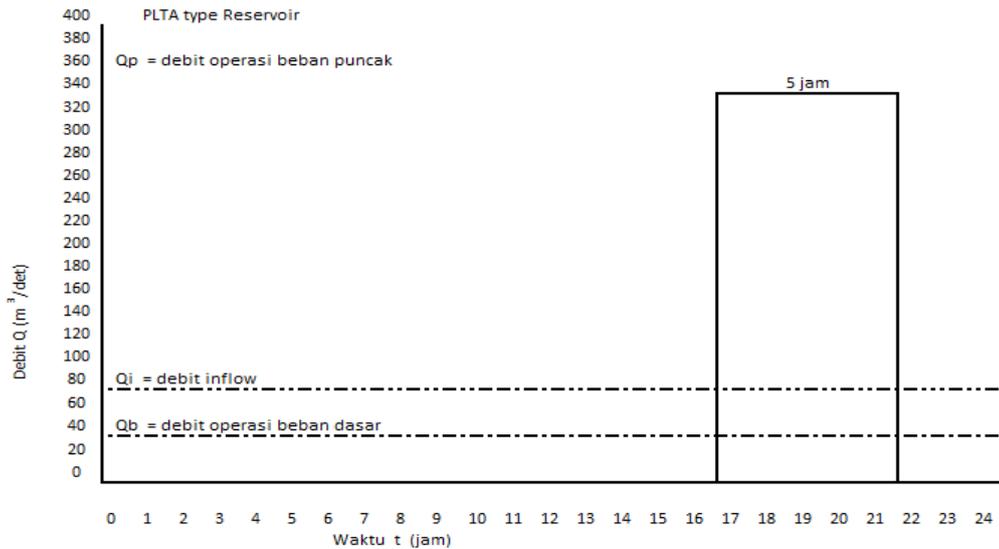
$S_t$  = Tampungan waduk pada waktu t

$I_t$  = Inflow ke waduk pada waktu t

$O_t$  = Outflow dari waduk pada waktu t

$L_t$  = Kehilangan air di waduk pada waktu t

$C$  = Kapasitas tampungan efektif waduk



**Gambar 2.5 Pola Konsep Operasi Harian**

Sumber : Hasil Penelitian

### 2.5. Desain Hidraulik Pembangkit Listrik Tenaga Air

Dalam perencanaan pembangkit listrik tenaga air maka harus direncanakan komponen penyusun dari pembangkit listrik, sistem pembawa air, dan pelengkap. Seperti yang telah diketahui bahwa energi listrik yang dihasilkan berasal dari energi kinetik yang berasal dari air dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin dan energi mekanik dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Dimana desain sistem pembawa air dirancang berdasarkan prinsip hidraulika sehingga didapatkan perencanaan bangunan yang ekonomis dan aman, sedangkan untuk turbin dan generator direncanakan dalam satu unit rumah pembangkit (*power house*).

### 2.6. Komponen Baja dalam Perencanaan PLTA

Baja merupakan logam paduan antara besi dan karbon dimana kadar karbonnya kurang dari 2%. Sedangkan untuk yang kadar karbonnya antara 2% sampai dengan 6,67% disebut dengan besi cor.

Sifat-sifat mekanik baja sangat erat hubungannya dengan struktur mikronya. Sifat suatu baja dapat diubah dengan mengubah struktur mikronya melalui proses perlakuan panas, seperti *quenching*, *annealing* dan *tempering*. Dalam proses pembuatan baja akan terdapat unsur-unsur lain selain karbon yang akan tertinggal di dalam baja seperti mangan (Mn), silikon (Silikon), kromium (Cr), vanadium (V), dan unsur lainnya. Dalam hal aplikasi, baja sering digunakan sebagai bahan baku untuk alat-alat

perkakas, alat-alat pertanian, komponen-komponen otomotif, kebutuhan rumah tangga, dan lain-lain.

### **2.6.1. Klasifikasi Baja**

Baja dapat diklasifikasikan berdasarkan komposisi kimianya seperti kadar karbon dan paduan yang digunakan. Berikut merupakan klasifikasi baja berdasarkan komposisi kimianya.

#### **1. Baja karbon**

Baja karbon adalah baja yang sifat-sifatnya dipengaruhi oleh kadar karbonnya. Oleh karena itu, pada umumnya sebagian besar baja hanya mengandung karbon dengan sedikit unsur paduan lainnya.

#### **2. Baja paduan**

Baja paduan adalah baja yang sifatnya dipengaruhi oleh kadar karbon dan unsur-unsur paduan yang ditambahkan. Sebagai contoh paduan baja dengan Cr, Ni, Mn, Mo, V, dan W yang berguna untuk memperoleh sifat-sifat baja yang dikehendaki seperti sifat kekuatan, kekerasan, dan keuletannya.

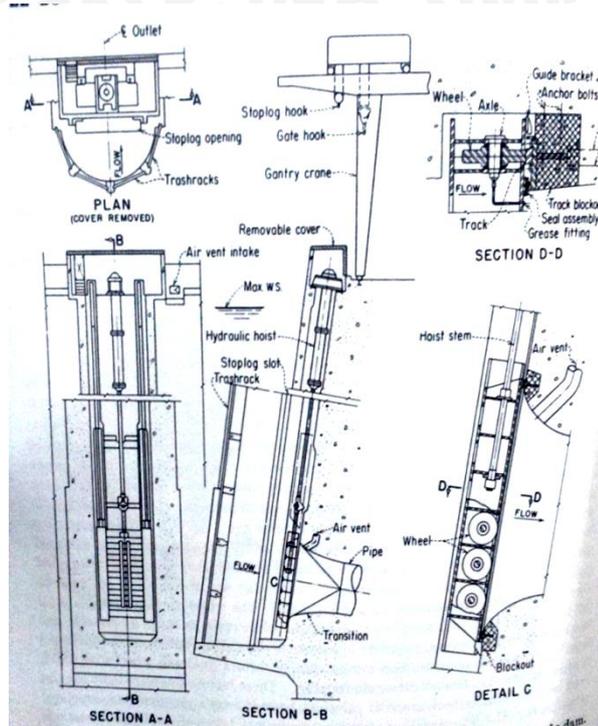
### **2.7. Komponen Bangunan PLTA**

PLTA Karangates IV & V merupakan PLTA dengan kategori kolam tendon (*reservoir*). Komponen dari pembangkit listrik tenaga air dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori sesuai dengan fungsi dan perletakan bangunan. Berdasarkan fungsinya komponen bangunan PLTA dikelompokkan menjadi:

#### **2.7.1. Pintu Pengambilan**

Pintu pengambilan adalah pintu untuk mengatur jumlah air yang masuk ke saluran / terowongan sesuai kebutuhan. Desain pintu pengambilan ini direncanakan berdasar atas kebutuhan air sesuai dengan desain perencanaan. Jenis dan type intake antara lain ;

- Canal Intake
- Reservoir Intake
- Tunnel Intake



**Gambar 2.6 Intake pengambilan**  
 Sumber: *Davis & Sorensen, 1969: 22-26*

Standart kecepatan pada intake menurut Justin dan Creager

$$V = 0,12 \sqrt{2gH} \quad (2-3)$$

Dimana :

H = ketinggian dari dasar pintu ke tinggi air

## 2.8. Bangunan Pembawa (*Water Way*)

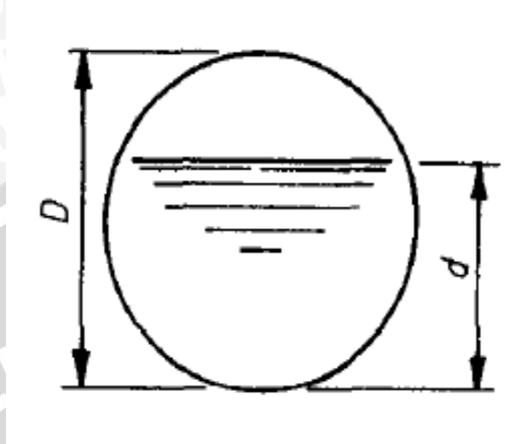
Bangunan pembawa merupakan bangunan yang berfungsi untuk mengantarkan air atau membawa air mulai dari bangunan pengambilan menuju ke rumah pembangkit. Terdapat bermacam bentuk dari bangunan pembawa tergantung dari sistem pembawaan air menuju rumah pembangkit, bangunan pembawa antara lain:

### 2.8.1. Terowongan (*Tunnels*)

Secara umum terowongan adalah bangunan yang berada di bawah permukaan tanah. Fungsi terowongan adalah membawa air dari intake menuju penstock dan akhirnya ke turbin pembangkit. Aliran dalam terowongan diusahakan aliran tertutup, dikarenakan untuk menjaga tekanan pada air. Macam-macam penampang terowongan menurut (Varshney, 1977:347)

➤ Penampang Lingkaran

Penampang jenis ini paling banyak digunakan dan sangat cocok untuk mempertimbangkan *hydraulic* dan struktur dari terowongan. Tetapi penampang jenis ini tidak terlalu cocok digunakan pada jenis tanah yang mayoritas batuan.

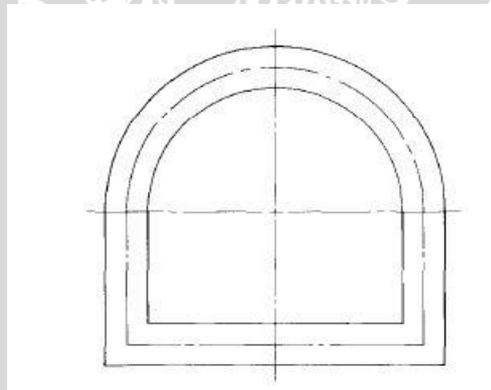


**Gambar 2.7 Penampang lingkaran**

Sumber: *Varshney, 1997: 347*

➤ Penampang berbentuk D

Penampang jenis ini biasanya digunakan di daerah pegunungan api dan jenis tanah yang berbatu dan hasil dari sedimentasi.

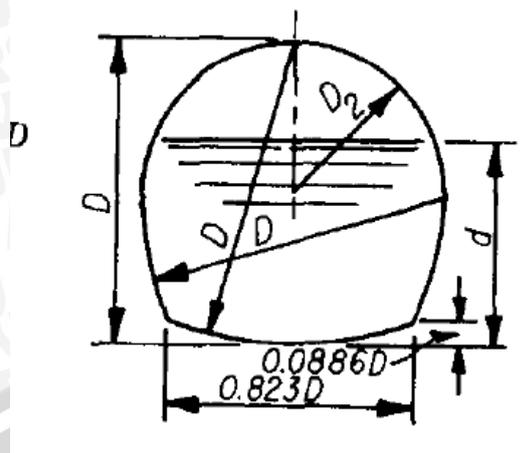


**Gambar 2.8 Penampang berbentuk D**

Sumber: *Varshney, 1997: 347*

➤ Penampang berbentuk tapal kuda

Penampang jenis ini merupakan gabungan dari penampang lingkaran dan penampang D. Penampang jenis ini sangat kuat menahan tekanan dari luar. Kualitas dan jenis batuan mempengaruhi tekanan didalam terowongan.



**Gambar 2.9 Penampang Tapal Kuda**

Sumber: Varshney, 1997: 347

➤ Penampang berbentuk telur

Penampang ini digunakan pada batuan yang berlapis-lapis dan dimana batuan yang jatuh menyebabkan meningkatnya tekanan eksternal pada terowongan

**2.8.2. Pipa Pesat (*Penstock*)**

Pipa pesat adalah saluran yang menyalurkan dan mengarahkan air dari waduk ke turbin. Diameter pipa pesat dipilih dengan pertimbangan keamanan, kemudahan proses pembuatan, ketersediaan material dan tingkat rugi (*friction losses*) seminimal mungkin. Pipa pesat biasanya dilengkapi dengan tangki peredam (*surge tank*) yang berfungsi untuk menyerap pukulan air serta menyimpan air cadangan untuk mengatasi peningkatan beban yang tiba-tiba.

Berdasarkan lokasinya pipa pesat dibagi dua, yaitu:

1. Pipa pesat tertanam (*Burried penstock*)

Untuk penanaman batang pipa dalam tanah, maka topografi tanah dan sisa kelebihan dari pipa harus dipikirkan dengan baik. (Dandenkar dan Sharma, 1991:273). Kelebihan dan kekurangan dari tipe ini adalah (Varshney, 1977:402):

Kelebihan :

- a. Terlindung dari pengaruh suhu karena tertutup tanah
- b. Terlindung dari pembekuan
- c. Tidak membutuhkan sambungan (*Expansion joints*)
- d. Landscape tetap tidak bias diubah
- e. Terlindung dari gempa, longsoran tanah, dan badai

f. Dapat mengurangi ketebalan pipa

Kekurangan :

- a. Akses yang sulit untuk inspeksi
- b. Biaya mahal jika diameter besar dan kondisi tanah berbatu
- c. Cenderung terjadi pergeseran pipa pada lembah yang curam
- d. Membutuhkan lapisan tertentu terhadap korosi dan salinitas tanah
- e. Sulit dalam pemeliharaan dan perbaikan

2. Pipa pesat tidak tertanam (*Exposed penstock*)

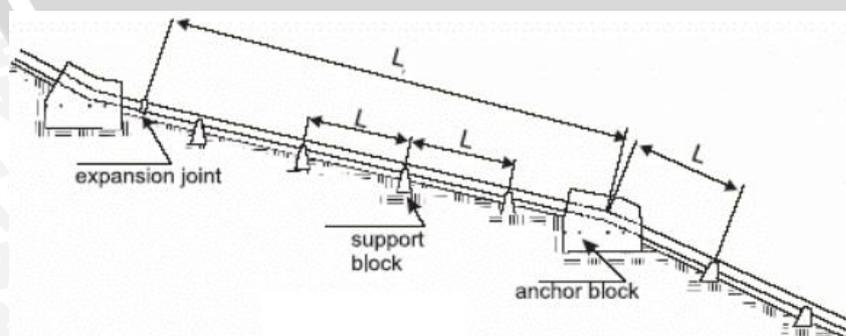
Pipa diatas tanah didukung oleh fondasi atau tanggul penunjang. Menurut USBR, batang pipa yang tidak terlindung termasuk batang pipa yang didukung diatas tanah dan batang pipa yang dilindungi oleh lapisan beton tidak diijinkan untuk menahan tegangan struktur. (Dandenkar dan Sharma, 1991:275) Kelebihan dan kekurangan dari tipe ini adalah (Varshney, 1977:403):

Kelebihan :

- a. Mudah dalam inspeksi
- b. Biaya instalasi lebih murah
- c. Terlindung terhadap longsoran jika dilengkapi dengan blok anker
- d. Mudah dalam pemeliharaan dan perbaikan

Kekurangan :

- a. Sangat terpengaruh oleh suhu eksternal
- b. Kemungkinan terjadi pembekuan saat musim dingin
- c. Tekanan longitudinal mungkin timbul karena blok anker
- d. Diperlukan sambungan (*Expansion joints*)



**Gambar 2.10 Pipa Pesat Tak Tertanam**

Sumber: *Penche, 2004:134*



H : tinggi jatuh (m)

Formula diameter ekonomis yang dikembangkan ESHA:

$$D = \left( \frac{10,3n^2Q^2}{hf} \right)^{0,1875} \quad (2-7)$$

Dimana:

D : diameter pipa (m)

n : koef kekasaran pipa

Q : debit pada pipa (m<sup>3</sup>/dt)

Hf : kehilangan tinggi tekan total pada pipa (m)

### Tebal pipa pesat

Perhitungan tebal pipa pesat dapat menggunakan beberapa persamaan, antara lain:

Tebal Pipa untuk Handling

1. ASME (Mosonyi,1963:270):

$$t = 2,5 D + 1,2 \quad (2-8)$$

2. USBR (Varshney,1971:412):

$$t = \frac{d+500}{400} \quad (2-9)$$

Tebal pipa untuk menahan tekanan

3. ESHA (Penche,20004) :

$$e = \frac{PD}{2\sigma kf} + es \quad (2-10)$$

4. Barlow's Formulae (Varshney,1971:412):

$$H = \frac{0,002 + \sigma \times t}{D + 0,002 t} \quad (2-11)$$

Dimana:

H : Tinggi tekan maksimum ( m )

: tekanan statis + tinggi tekan akibat pukulan air

$\sigma$  : tegangan baja yang digunakan ( ton/m<sup>2</sup> )

D : diameter pipa pesat ( m )

t : tebal pipa pesat ( m )

P : tekan hidrostatik dalam pipa (kN/mm<sup>2</sup>)

kf : efisiensi ketahanan (k = 1 untuk pipa utuh)

es : tebal jagaan untuk sifat korosif (mm)

sifat material bahan untuk pipa pesat ditampilkan pada tabel berikut:

**Tabel 2.1. Karakteristik Bahan Material Pipa Pesat**

Material	Young's modulus of elasticity E(N/m <sup>2</sup> )E9	Coefficient of linear expansion a (m/m <sup>0</sup> c)E6	Ultimate tensile strength (N/m <sup>2</sup> )E6	n
Welded Steel	206	12	400	0.012
Polyethylene	0.55	140	5	0.009
Polyvinyl Chloride (PVC)	2.75	54	13	0.009
Asbestos Cement	n/a	8.1	n/a	0.011
Cast iron	78.5	10	140	0.014
Ductile iron	16.7	11	340	0.013

Sumber: *Penche, 2004:137*

### Pengaruh Pukulan Air Terhadap Pipa Pesat

Perhitungan tekanan hidrostatik untuk pipa perlu memperhatikan pengaruh pukulan air terhadap pipa, dimana kenaikan air akibat pukulan air dapat merusak pipa. Rumus *Water Hammer* sebagai berikut (Chaudhry, 2014):

$$\alpha = \sqrt{\frac{K}{\rho [1 + (\frac{K}{E})\psi]}} \quad (2-12)$$

$$\rho = \frac{\alpha V_0}{2gH_0} \quad (\text{Allievi pipeline constan}) \quad (2-13)$$

$$\theta = \frac{\alpha T}{2L_0} \quad (\text{Closing time constan}) \quad (2-14)$$

$$n = \frac{\rho}{\theta} \quad (2-15)$$

dimana untuk turbin Francis rumusnya adalah sebagai berikut :

$$\frac{h_0}{H_0} = \left( \frac{0,75}{\theta\sqrt{\theta}} + 1,25 \right) n \quad (2-16)$$

dimana:

$\rho$  : tekanan hidrostatik akibat tinggi jatuh (*head*)

$V$  : kecepatan (m/dt)

$T$  : waktu penutupan katup (detik)

$h_0$  : tinggi pukulan air terhadap katup (m)

$H_0$  : Tinggi tekana saat masuk dan keluar katup di turbin (m)

- $k$  : modulus air ( $2,1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ )  
 $g$  : gravitasi ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $E$  : Modulus elatis bahan pipa  
 $\alpha$  : Kecepatan gelombang  
 $L_0$  : Panjang saluran pipa (m)

### Kedalaman Minimum Aliran Tenggelam Pada Inlet Pipa Pesat

Menurut Penche intake pipa pesat harus direncanakan sedemikian rupa sehingga tidak mengalami vorticity, vorticity adalah fenomena kekurangan tekanan dalam pipa pesat sehingga dapat mengganggu kinerja turbin. Menurut Gordon dalam Penche, 2004 kedalaman tenggelam harus lebih besar dari nilai "s" dimana nilai s dihitung dengan persamaan (Penche, 2004:120) :

$$H_t > s$$

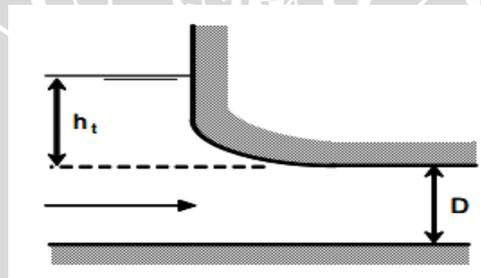
$$s = c V \sqrt{D} \quad (2-17)$$

Dimana:

$c$  : 0,7245 untuk inlet asimetris  
 0,5434 untuk inlet simetris

$V$  : kecepatan masuk aliran (m/dt)

$D$  : diameter inlet pipa pesat (m)



**Gambar 2.11 Skema Inlet Pipa Pesat**

Sumber: Penche, 2004:119

### Sistem Pengambilan Melalui Pipa Pesat (Intake)

Sistem pengambilan pada mulut pipa pesat perlu diperhitungkan dengan tujuan untuk mengatur sistem regulasi debit air yang masuk ke dalam turbin baik saat kondisi operasional maupun kondisi perawatan, intake pipa pesat biasanya didesain dengan menggunakan sistem katup (*valve*), Tipe katup yang sering diaplikasikan adalah :

- Gate valve
- Butterfly valve
- Needle valve



Menghitung luas *Surge Tanks* (Thoma)

$$A_{st} = \frac{At Lt}{2 g c H} \quad (2-18)$$

$$D_{st} = \sqrt{\frac{A_{st}}{0,25 \pi}} \quad (2-19)$$

Dimana :

- $A_{st}$  = Luas *Surge Tanks* (m<sup>2</sup>)
- $D_{st}$  = Diameter *Surge Tanks* (m)
- $L_t$  = panjang terowongan (m)
- $A_t$  = Luas penampang Terowongan (m<sup>2</sup>)
- $H$  = *Gross Head* (m)
- $g$  = gravitasi (m<sup>2</sup>/s)
- $c$  = koefisien thoma

Sedangkant rumus menghitung ketinggian air dalam *Surge Tanks* (metode

Permakian):

$$Z_{st} : v \left( \frac{Lt At}{g A_{st}} \right)^{0,5} \quad (2-20)$$

Dimana :

- $Z_{st}$  = Tinggi muka air didalam *surge tanks* (m)
- $v$  = kecepatan air didalam terowongan (m/s)
- $L_t$  = panjang terowongan (m)
- $A_t$  = Luas penampang Terowongan (m<sup>2</sup>)
- $g$  = gravitasi (m<sup>2</sup>/s)
- $A_{st}$  = Luas *Surge Tanks* (m<sup>2</sup>)

#### **Kebutuhan Terhadap Tangki Gelombang (*Surge Tank*)**

Tangki gelombang dibutuhkan untuk melindungi pipa pesat dari bahaya tekanan yang terlalu besar pada pipa pesat, menurut AHEC,2009:50 Pipa pesat membutuhkan tangki gelombang bila:

$$L > 4H$$

Dimana:

$L$  : panjang total pipa pesat (m)

$H$  : tinggi jatuh (m)

### 2.10. Rumah Pembangkit (*Power House*)

Rumah pembangkit, merupakan bangunan tempat diletakkannya seluruh perangkat konversi energi, mulai dari turbin air lengkap dengan governornya, sebagai pengatur tekanan air, sistem transmisi mekanik (jika diperlukan), generator, perangkat pendukung lain, seperti : panel kontrol, panel distribusi daya, beban komplemen, dan sebagainya. Bangunan inilah yang melindungi turbin, generator dan peralatan pembangkit lainnya.

### 2.11. Saluran Pembuang (*Tailrace Cannal*)

Saluran pembuang difungsikan untuk membuang aliran debit dari *draft tube* menuju area pembuangan (sungai). Bentuk desain dari saluran pembuang bisa bermacam macam tergantung dari kondisi topografi dan dengan memperhatikan aspek penempatan titik pusat turbin, apakah turbin ditempatkan lebih tinggi dari *tail water level* atau lebih rendah dari *tail water level*.

Saluran pembuang dapat direncanakan dengan menggunakan tipe saluran terbuka atau dengan menggunakan tipe saluran tertutup, untuk saluran terbuka perencanaan saluran pembuang menggunakan persamaan manning strickler, sementara untuk saluran tertutup direncanakan dengan menggunakan persamaan untuk aliran bertekanan (*pressured flow*).

### 2.12. Tinggi Jatuh Efektif (*Net Head*)

Tinggi jatuh efektif adalah selisih antara elevasi muka air pada bangunan pengambilan atau waduk (EMAW) dengan *tail water level* (TWL) dikurangi dengan total kehilangan tinggi tekan (Ramos, 2000:57). Persamaan tinggi jatuh efektif adalah:

$$H_{\text{eff}} = \text{EMAW} - \text{TWL} - h_l \quad (2-21)$$

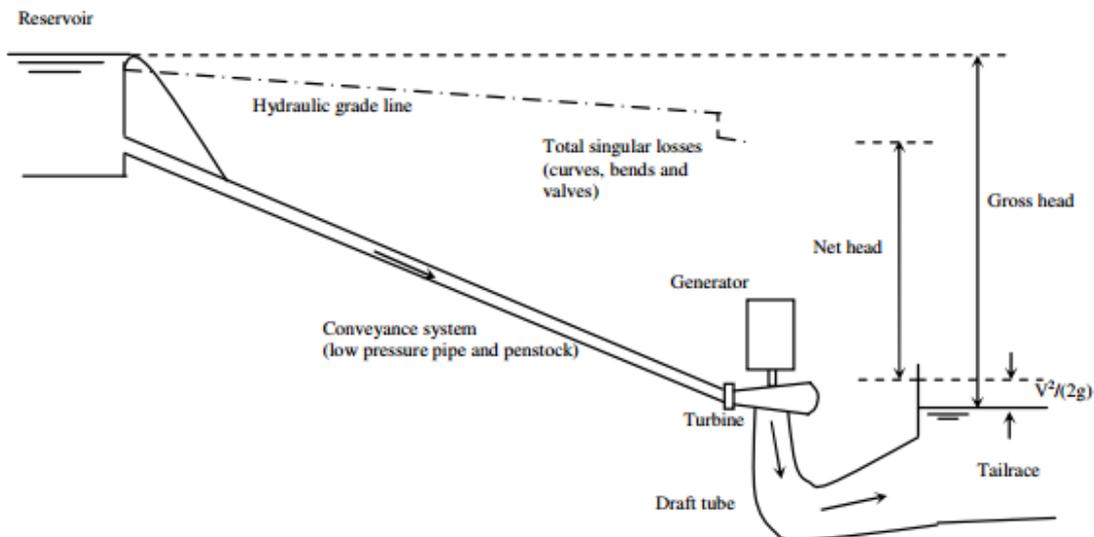
dimana:

$H_{\text{eff}}$  : tinggi jatuh efektif (m)

EMAW: elevasi muka air waduk atau hulu bangunan pengambilan (m)

TWL : *tail water level* (m)

$h_l$  : total kehilangan tinggi tekan (m)



**Gamabr 2.14 Sketsa Tinggi Jatuh Effektif**

Sumber : Ramos,2000:61

### 2.12.1. Kehilangan Tinggi (*Head Loss*)

Kehilangan tinggi energi adalah menurunnya besarnya energi akibat gesekan maupun kontraksi yang terjadi selama proses pengaliran, berdasarkan hukum kekekalan energi pada persamaan Bernoulli besarnya energi adalah sama namun terjadi penurunan energi atau kehilangan energi pada kisi atau section setelah mengalami gesekan, perubahan bentuk dan hambatan.

dalam perhitungan kehilangan tinggi pada perencanaan sistem pembangkit listrik tenaga air dapat dibedakan menjadi 2 yaitu kehilangan tinggi pada saluran terbuka dan kehilangan tinggi pada saluran tertutup.

#### a. Kehilangan tinggi pada saluran terbuka.

Kehilangan tinggi pada saluran terbuka dihitung dengan dua buah kondisi yaitu:

- Kehilangan pada bangunan pengambilan dihitung dengan persamaan (patty,1995):

$$h_f = f \frac{V^2}{2g} \quad (2-22)$$

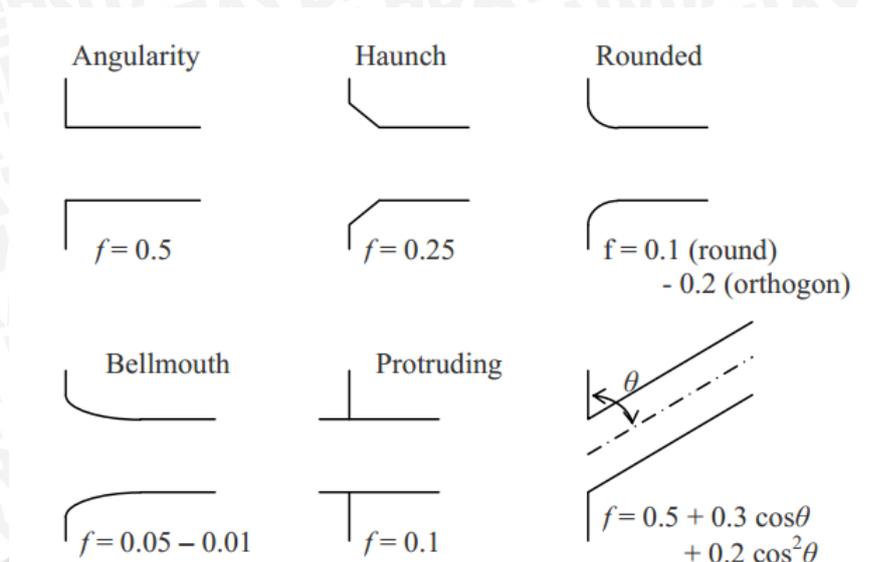
dimana:

$h_f$  : kehilangan tinggi pada bangunan pengambilan (m)

$V$  : kecepatan masuk (m/s)

$g$  : percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

$f$  : koefisien kehilangan tinggi, lihat gambar 2.21



**Gambar 2.15 Nilai f Berdasarkan Bentuk Inlet**

Sumber : *MHP-1,2009:5-13*

- Kehilangan tinggi pada penyaring dihitung dengan persamaan kirschmer (Penche,2004:23)

$$ht = KT \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} \left(\frac{v_0}{2g}\right) \sin\theta \quad (2-23)$$

dengan:

ht : Kehilangan tinggi pada penyaring(m)

v<sub>0</sub> : Kecepatan datang (m/dt)

t : Tebal jeruji (mm)

b : Jarak abtar jeruji (mm)

θ : sudut dasar jeruji (derajat)

#### b. Kehilangan tinggi pada saluran tertutup.

Perhitungan kehilangan pada saluran tertutup dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu kehilangan tinggi mayor (*major losses*) dan kehilangan tinggi minor (*minor losses*), kehilangan tinggi mayor disebabkan oleh gesekan yang terjadi didalam pipa akibat kekasaran dari pipa itu sendiri, besarnya kehilangan tinggi mayor pada saluran tertutup dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

- Chezy – Manning (Penche,2004:33):

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (2-24)$$

$$hf = \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} \quad (2-25)$$

Dimana :

$V$  = kecepatan aliran (m/s)

$R$  = Jari-jari hidraulik

$S$  = kemiringan saluran

$n$  = koefisien kekasaran manning

$L$  = Panjang saluran (m)

$hL$  = *Head Loss*

nilai koefisien kekasaran manning

Sangat kasar = 0,040 – 0,060

Permukaan kasar = 0,025 – 0,035

Permukaan keras = 0,020 – 0,030

Sedangkan perhitungan kehilangan tinggi minor dapat dihitung dengan persamaan berikut (Ramos, 2000:64):

$$h_f = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2-26)$$

dimana :

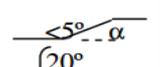
$\zeta$  = keofisien berdasarkan jenis kontraksi

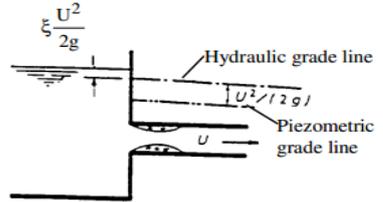
$V$  = kecepatan masuk (m/dt)

$g$  = percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)

nilai  $\zeta$  dapat ditentukan berdasarkan jenis kontraksi atau hambatan yang terjadi pada pengaliran, berikut jenis kontraksi dan hambatan yang diperhitungkan (Ramos,2000:64):

a. Kontraksi

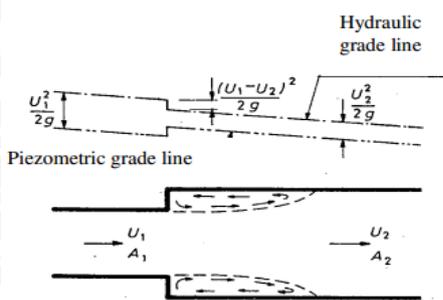
Type of contraction	$\zeta$
sharp edge	0.50
rounded edge	0.25
conical horn	0.10
gradual	
	0.06
$\alpha$ $\left\{ \begin{array}{l} 20^\circ \\ 45^\circ \\ 60^\circ \\ 75^\circ \end{array} \right.$	 0.20 0.30 0.32 0.34



**Gambar 2.17** Kisaran nilai  $\zeta$  Berdasarkan Tipe Kontraksi

Sumber : Ramos,2000:64

b. Penyempitan / pelebaran



**Gambar 2.18** Sketsa Situasi Kehilangan Tinggi Akibat Penyempitan Dan Pelebaran

Sumber : Ramos,2000:64

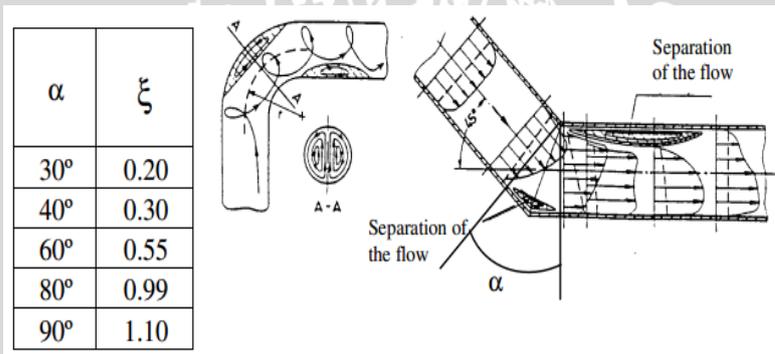
$$\xi = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad (2-27)$$

dimana:

$\xi$  = koefisien

A = luas penampang (m<sup>2</sup>)

c. Tikungan / belokan

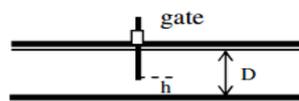


**Gambar 2.19** Kisaran Nilai  $\xi$  Akibat Belokan

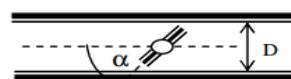
Sumber : Ramos,2000:65

d. Pintu dan katup

h/D	$\xi$
0.20	31.4
0.50	3.3
0.70	0.8



$\alpha$	$\xi$
5°	0.24
20°	1.54
40°	10.8
60°	118



**Gambar 2.20** Kisaran Nilai  $\xi$  Akibat Pintu dan Katup

Sumber : Ramos,2000:65

e. penyaring

besarnya kehilangan tinggi akibat penyaring (*trashrack*) dihitung dengan persamaan berikut :

$$h_i = k_t \frac{V^2}{2g} \quad (2-28)$$

Dimana :

V = kecepatan aliran (m/s)

g = gravitasi (m<sup>2</sup>/s)

$k_t$  = koefisien kehilangan di saringan =  $1,45 - 0,45 \frac{a_n}{a_g} - \left(\frac{a_n}{a_g}\right)^2$

$a_n$  = luas area bersih saringan

$a_g$  = luas area saringan keseluruhan

### 2.13. Turbin Hidraulik

Menurut M.M. Dandekar (1991:391) turbin-turbin hidraulik, berhubungan erat dengan generator, fungsi utamanya adalah mengubah energi air menjadi energi listrik. Air mengalir melalui turbin, memberi tenaga pada *runner* (penggerak) dari turbin dan membuatnya berputar (energi mekanis). Energi mekanis diubah dengan generator listrik menjadi tenaga listrik.

#### 2.13.1. Klasifikasi Turbin

Berdasarkan prinsip kerja turbin dalam mengubah energi potensial air menjadi energi mekanis, turbin air dibedakan menjadi dua kelompok yaitu turbin impuls dan turbin reaksi.

Perbedaan pokok kedua golongan turbin tersebut adalah :

1. Runner turbin impuls berputar di udara karena mendapat pancaran air. Dengan demikian maka seluruhnya (atau hampir seluruhnya) diubah menjadi energi kinetik untuk memutar *runner*.
2. Runner turbin reaksi berputar didalam air oleh energi dalam bentuk tekanan dan kinetik.

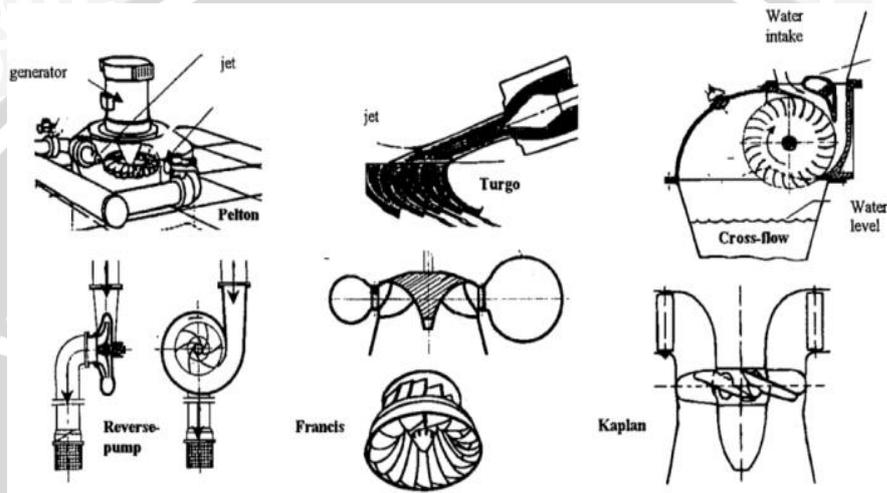
Untuk memudahkan pemakaian jenis turbin, maka turbin-turbin tersebut diklasifikasikan sebagai berikut:

**Tabel 2.2. Klasifikasi dan Kapasitas Turbin**

turbin hidraulik		H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P (kW)	n (r.p.m)
Reaksi:	bulb	2 - 10	3 - 40	100 - 2500	200 - 450
	kaplan dan baling - baling dengan aliran	2 - 20	3 - 50	50 - 5000	250 - 700

turbin hidraulik		H (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	P (kW)	n (r.p.m)
	axial				
	francis dengan aliran diagonal	10 - 40	0,7 - 10	100 -5000	100 -250
	francis dengan aliran radial	40 -200	1 - 20	500 - 15000	30 -100
impuls:	pelton	60 – 1000	0,2 - 5	200 -15000	< 30
	turgo	30 -200		100 - 6000	
	cross flow	2 - 50	0.01 – 0.12	2 -15	

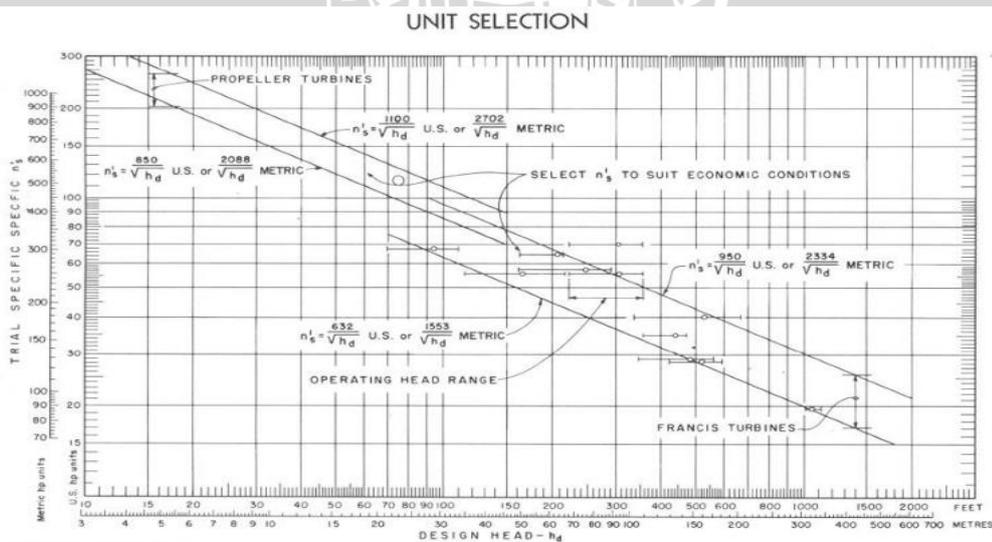
Sumber: Ramos,2000:82



**Gambar 2.21 Jenis Turbin Untuk Pembangkitan Tenaga Air**

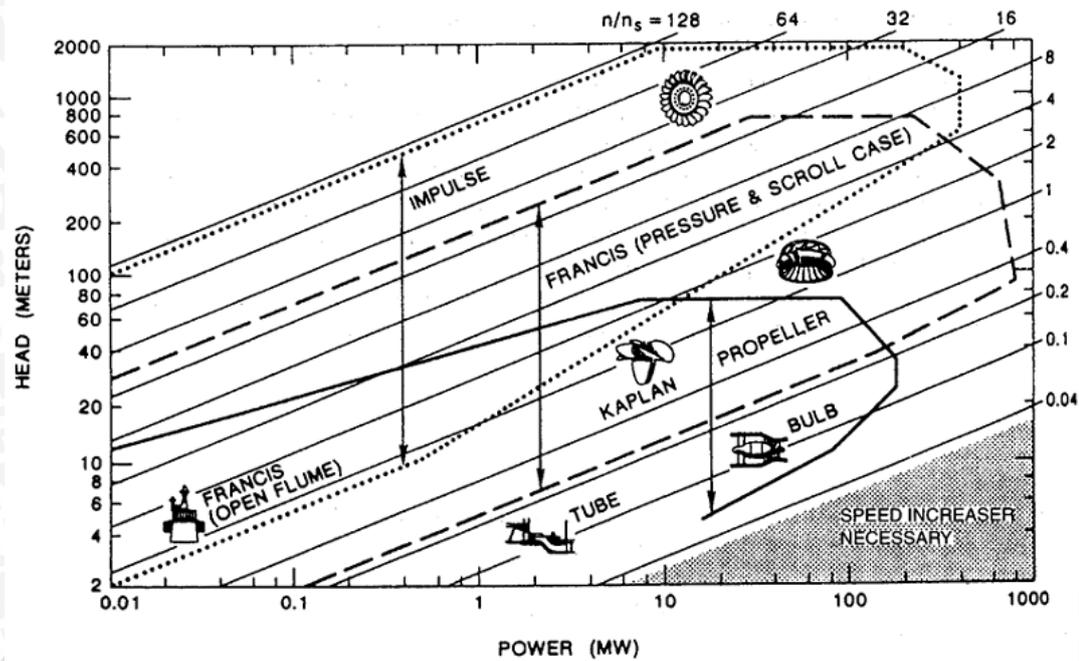
Sumber: Ramos,2000:83

Selain berdasarkan klasifikasi tersebut, pemilihan jenis turbin juga bisa ditentukan berdasarkan Gambar berikut:



**Gambar 2.22 Grafik Pemilihan Jenis Turbin Berdasarkan Kecepatan Spesifik Dan Tinggi Jatuh**

Sumber: USBR,1976:15



**Gambar 2.23 Grafik Pemilihan Jenis Turbin Berdasarkan Kecepatan Spesifik, Tinggi Jatuh dan Daya**

Sumber: Roger E. A. Arndt, 1998

Dalam pemilihan harus diperhatikan karakteristik dari masing masing turbin, turbin reaksi biasa digunakan untuk pembangkit listrik dengan tinggi jatuh sedang – kecil sedangkan turbin impuls digunakan untuk tinggi jatuh besar, faktor lain yang perlu diperhatikan adalah tentang putaran dan kecepatan spesifik turbin, karena kecepatan spesifik turbin merupakan karakteristik yang mendasari dalam perencanaan turbin.

### 2.13.2. Karakteristik Turbin

Karakteristik turbin adalah parameter yang mendasari perencanaan turbin hidrolik, karakteristik turbin meliputi kecepatan spesifik turbin ( $N_s$ ), kecepatan putar turbin atau kecepatan sinkron generator ( $n$ ). dalam perencanaan karakteristik turbin dapat digunakan beberapa metode antara lain metode yang diterapkan oleh *United state bureau of reclamation* (USBR) dan metode yang diterapkan oleh *European small hydropower association* (ESHA), yang memiliki tata cara perhitungan karakteristik turbin masing masing. Berikut adalah tata cara perencanaan karakteristik turbin berdasarkan masing masing metode:

#### Metode USBR (*united state of bureau reclamation*)

Persamaan untuk menghitung besarnya kecepatan spesifik pada turbin adalah (USBR, 1976:14):

$$N_s = n \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (2-29)$$

dengan:

$N_s$  : kecepatan spesifik (m-kW )

$P$  : Daya semu / teoritis (Hp)

$H$  : Tinggi jatuh (m)

$n$  : Putaran dasar turbin (rpm)

Dari persamaan tersebut tidak bisa diketahui besarnya nilai putaran dasar turbin ( $n$ ), putaran turbin untuk tiap tipe turbin berbeda beda. Maka putaran dasar turbin coba ( $n'$ ) dihitung dengan persamaan trial rotational speed ( $n'$ ) sebagai berikut:

$$\text{Untuk turbin francis} \quad : n' = \frac{2334}{\sqrt{H}} \quad \text{atau} \quad n' = \frac{1553}{\sqrt{H}} \quad (2-30)$$

$$\text{Untuk turbin propeller} \quad : n' = \frac{2088}{\sqrt{H}} \quad \text{atau} \quad n' = \frac{2702}{\sqrt{H}} \quad (2-31)$$

Dari putaran turbin coba ( $n'$ ) maka harus dicek dengan kecepatan sinkron generator jika akan menggunakan generator sinkron, kecepatan sinkron generator dihitung dengan persamaan (USBR,1976:14):

$$n = \frac{120f}{P} \quad (2-32)$$

Dimana:

$n$  : kecepatan sinkron generator (rpm)

$f$  : frekuensi generator (50 – 60 Hz)

$p$  : jumlah kutub generator (*poles*)

setelah mendapatkan nilai putaran turbin ( $n$ ) maka harus dihitung besarnya nilai desain kecepatan spesifik (*design specific speed*) turbin dengan persamaan (2 – 29), nilai batas kecepatan spesifik untuk tiap turbin adalah berbeda – beda, USBR merekomendasikan kisaran nilai kecepatan spesifik untuk tiap jenis turbin adalah sebagai berikut(USBR,1976:9):

$$\text{turbin francis} \quad : 65 \leq N_s \leq 445$$

$$\text{turbin propeller} \quad : 300 \leq N_s \leq 1000$$

#### **Metode ESHA (*European small hydropower association*)**

ESHA menggunakan standar internasional IEC 60193 dan 60041 untuk menentukan besarnya nilai kecepatan spesifik turbin, Formula untuk menghitung besarnya kecepatan spesifik adalah (Penche,2004:168):

$$N_{QE} = n \frac{\sqrt{Q}}{E^{3/4}} \quad (2-33)$$

dengan:

$N_{QE}$  : kecepatan spesifik (tak berdimensi)

$Q$  : debit desain ( $m^3/dt$ )

$E$  : energi hidrolik spesifik didapat dari ( $E = H \times g$ ) (j/kg)

$n$  : Putaran dasar turbin (t/s)

Hubungan atau kesetaraan dari nilai  $N_{QE}$  dengan nilai parameter turbin dengan menggunakan metode lain seperti: kecepatan spesifik ( $N_s$ ), faktor kecepatan ( $\phi$ ) dan putaran satuan ( $N_Q$ ) adalah sebagai berikut (Penche,2004:168):

$N_s$  :  $995 N_{QE}$

$N_Q$  :  $333 N_{QE}$

$\phi$  :  $2,11 N_{QE}$

Dalam perhitungan kecepatan spesifik turbin nilai putaran dasar turbin harus di coba coba terlebih dahulu untuk memperkirakan besarnya putaran dasar turbin maka digunakan persamaan empiris untuk mengetahui nilai kecepatan spesifik turbin ( $N_{QE}'$ ) dengan persamaan berikut (Penche,2004:169):

Turbin Pelton  $N_{QE}' = 0.0859 / H^{0.243}$  (2 -34)

Turbin Francis  $N_{QE}' = 1.924 / H^{0.512}$  (2 -35)

Turbin Kaplan  $N_{QE}' = 2.294 / H^{0.486}$  (2 -36)

Turbin Propeller  $N_{QE}' = 2.716 / H^{0.5}$  (2 -37)

Turbin Bulb  $N_{QE}' = 1.528 / H^{0.2837}$  (2 -38)

Setelah itu maka putaran dasar turbin ( $n$ ) dan jumlah kutub generator ( $p$ ) bisa direncanakan berdasarkan kecepatan spesifik coba – coba ( $N_{QE}'$ ), ESHA memberikan kisaran nilai kecepatan spesifik untuk tiap turbin adalah sebagai berikut (Penche,2004:169):

turbin francis :  $0,05 \leq N_{QE} \leq 0,33$

turbin propeller, Kaplan dan bulb :  $0,19 \leq N_{QE} \leq 1,55$

turbin pelton :  $0,005 \leq N_{QE} \leq 0,025$

turbin pelton dengan ( $n$ ) *nozzle* :  $0,005 n^{0.5} \leq N_{QE} \leq 0,025 n^{0.5}$

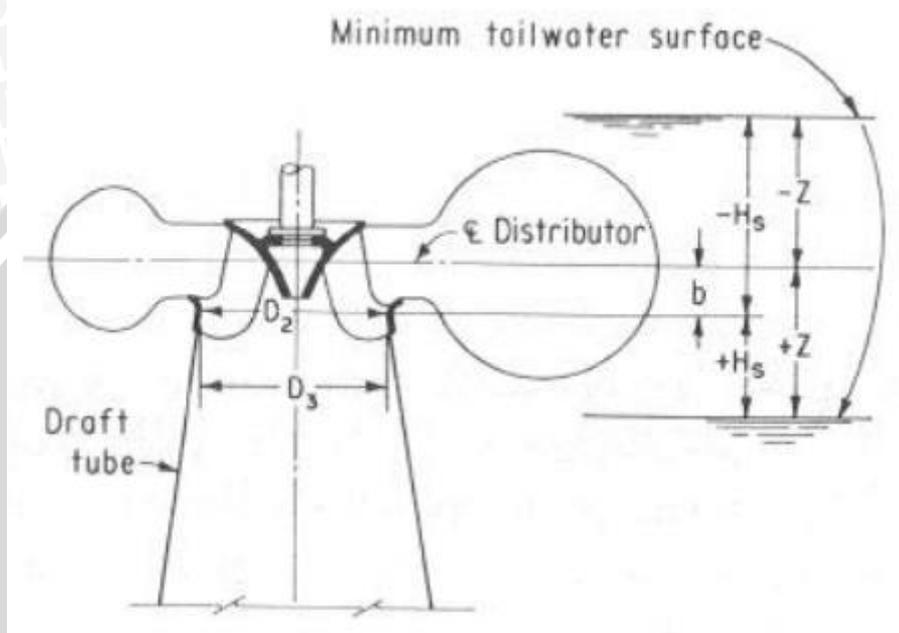
### 2.13.3. Kavitasi dan Titik Pusat Turbin

Kavitasi adalah suatu kejadian yang timbul dalam aliran dengan kecepatan yang besar, sehingga tekanan air menjadi lebih kecil daripada tekanan uap air maksimum di temperatur itu. Proses ini menimbulkan gelembung-gelembung uap air yang dapat menimbulkan erosi pada turbin ( Patty, 1995:99). Untuk menghindarkan bertambahnya kavitasi perlu (Arismunandar, 2004:70):

- Memilih sudu rotor yang tepat bentuknya,
- Memasang rotor pada posisi yang rendah terhadap permukaan air sebelah bawah (*tail water*),

- c. Memilih kecepatan jenis yang kecil,
- d. Memberi udara dalam jumlah yang tepat pada bagian atas dari pipa lepas,
- e. Melapisi sudu rotor dengan bahan yang tahan terhadap kavitasi.

Untuk menghindari terjadinya kavitas maka turbin harus diletakkan pada posisi yang aman yakni titik dari tinggi hisap ( $H_s$ ) sampai titik pusat turbin.



**Gambar 2.24 Skema Pemasangan Turbin Untuk Analisa Kavitasi**

Sumber: USBR,1976:23

Penentuan titik berat turbin atau elevasi pusat turbin dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$Z = TWL + H_s + b \quad (2 - 39)$$

Dimana:

$Z$  : titik pusat turbin (m)

$TWL$  : elevasi *tail water level* (m)

$H_s$  : Tinggi hisap turbin (m)

$b$  : perbedaan tinggi antar pusat turbin dengan outlet runner

Untuk menghitung tinggi hisap ( $H_s$ ) dapat dihitung dengan persamaan berikut

(USBR,1976:22):

$$H_s = H_a - H_v - H.\sigma \quad (2 - 40)$$

$$H_a = P_{atm} / \rho g \quad (2 - 41)$$

$$H_v = P_v / \rho g \quad (2 - 42)$$

dimana:

- Hs : tinggi hisap (m)
- Ha : tekanan atmosfer (m)
- Hv : tekanan uap air (m)
- H : tinggi jatuh efektif (m)
- $\sigma$  : koef thoma

Atau dengan menggunakan metode ESHA (Penche,2004:169):

$$H_s = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \sigma H \quad (2 - 43)$$

Dimana:

- Hs : tinggi hisap (m)
- Patm : tekanan atmosfer (Pa)
- Pv : tekanan uap air (Pa)
- H : tinggi jatuh efektif (m)
- $\sigma$  : koef thoma
- $\rho$  : berat jenis air (kg/m<sup>3</sup>)
- g : percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)
- V : kecepatan aliran (m/dt) (Penche,2004: 178 menyarankan 2 m/dt sebagai pendekatan awal)

Untuk mengontrol kavitasi digunakan koefisien thoma kritis ( $\sigma_c$ ) dihitung dengan menggunakan fungsi kecepatan spesifik dengan persamaan berikut:

Metode USBR(USBR,1976:22):

$$\sigma_c = \frac{N_s^{1.64}}{50327} \quad (2 - 44)$$

Metode ESHA(Penche,2004:169):

$$\text{Turbin Kaplan } \sigma_c = 1,5241 N_{QE}^{1,46} + \frac{V^2}{2gH} \quad (2 - 45)$$

$$\text{Turbin Francis } \sigma_c = 1,2715 N_{QE}^{1,41} + \frac{V^2}{2gH} \quad (2 - 46)$$

dimana:

- $\sigma_c$  : koefisien kritis thoma
- Ns :kecepatan spesifik (m kW) (metode USBR)
- N<sub>QE</sub> : kecepatan spesifik (metode ESHA)

Tabel 2.3. Nilai Tekanan Atmosfer

Altitude Above Sea Level		Absolute Barometer		Absolute Atmospheric Pressure		
feet	meters	inches Hg	mm Hg	psia	kg/cm <sup>2</sup>	kPa
-5000	-1524	35.7	908	17.5	1.23	121
-4500	-1372	35.1	892	17.2	1.21	119
-4000	-1219	34.5	876	16.9	1.19	117
-3500	-1067	33.9	861	16.6	1.17	115
-3000	-914	33.3	846	16.4	1.15	113
-2500	-762	32.7	831	16.1	1.13	111
-2000	-610	32.1	816	15.8	1.11	109
-1500	-457	31.6	802	15.5	1.09	107
-1000	-305	31.0	788	15.2	1.07	105
-500	-152	30.5	774	15.0	1.05	103
0 <sup>1)</sup>	0	29.9	760	14.7	1.03	101
500	152	29.4	746	14.4	1.01	99.5
1000	305	28.9	733	14.2	0.997	97.7
1500	457	28.3	720	13.9	0.979	96.0
2000	610	27.8	707	13.7	0.961	94.2
2500	762	27.3	694	13.4	0.943	92.5
3000	914	26.8	681	13.2	0.926	90.8
3500	1067	26.3	669	12.9	0.909	89.1
4000	1219	25.8	656	12.7	0.893	87.5
4500	1372	25.4	644	12.5	0.876	85.9
5000	1524	24.9	632	12.2	0.860	84.3
6000	1829	24.0	609	11.8	0.828	81.2
7000	2134	23.1	586	11.3	0.797	78.2
8000	2438	22.2	564	10.9	0.768	75.3
9000	2743	21.4	543	10.5	0.739	72.4
10000	3048	20.6	523	10.1	0.711	69.7
15000	4572	16.9	429	8.29	0.583	57.2
20000	6096	13.8	349	6.75	0.475	46.6
25000	7620	11.1	282	5.45	0.384	37.6
30000	9144	8.89	226	4.36	0.307	30.1
35000	10668	7.04	179	3.46	0.243	23.8
40000	12192	5.52	140	2.71	0.191	18.7
45000	13716	4.28	109	2.10	0.148	14.5
50000	15240	3.27	83	1.61	0.113	11.1

Sumber: [http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d\\_462.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d_462.html)

Tabel 2.4. Nilai Tekanan Uap Air

Temperature (°C)	Vapour pressure (kPa)	Vapour pressure (mmHg)
0	0.6	4.5
3	0.8	6.0
5	0.9	6.8
8	1.1	8.3
10	1.2	9.0
12	1.4	10.5
14	1.6	12.0
16	1.8	13.5
18	2.1	15.8
19	2.2	16.5
20	2.3	17.5
21	2.5	18.7
22	2.6	19.8
23	2.8	21.1
24	3.0	22.4
25	3.2	23.8
26	3.4	25.2
27	3.6	26.7
28	3.8	28.4
29	4.0	30.0
30	4.2	31.5
32	4.8	36.0
35	5.6	42.0
40	7.4	55.5
50	12.3	92.3
60	19.9	149.3
70	31.2	234.1
80	47.3	354.9
90	70.1	525.9
100	101.3	760.0

Sumber: [http://en.wikipedia.org/wiki/Vapour\\_pressure\\_of\\_water](http://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water)

Kavitasi akan terjadi pada  $\sigma = \sigma_{\text{crit}}$ . Besar kavitasi aktual dapat dihitung dengan persamaan berikut (Patty, 1995:100):

$$\sigma = \frac{H_a - H_w - H_s}{H} \quad (2 - 47)$$

dimana:

$\sigma$  : kavitasi

$H_a$  : tekanan atmosfer ( m )

$H_w$  : tekanan uap air disebelah bawah sudu rotor atau pada bagian atas pipa lepas (m)

$H_s$  : tinggi hisap atau draft head ( m )

$H_{\text{eff}}$  : tinggi jatuh air efektif ( m )

#### 2.13.4. Dimensi Turbin

Dalam perencanaan dimensi turbin maka harus ditentukan terlebih dulu jenis turbin yang akan digunakan apakah turbin impuls atau turbin reaksi, dalam perencanaan pembangkit listrik tenaga air dengan tinggi jatuh maka jenis turbin yang digunakan adalah turbin reaksi. Menurut Ramos (2000:94) turbin reaksi terdiri atas beberapa bagian sebagai berikut:

1. Rumah Siput (*Spiral Case*)

Rumah Siput berfungsi untuk mengubah energi tekanan menjadi energi kinetik aliran air yang masuk menuju ruang turbin.

2. *Wicket Gate* atau *Guide Vane*

Wicket gate berfungsi untuk mengarahkan air menuju runner turbin dengan aliran seragam.

3. Pemutar (*Runner*)

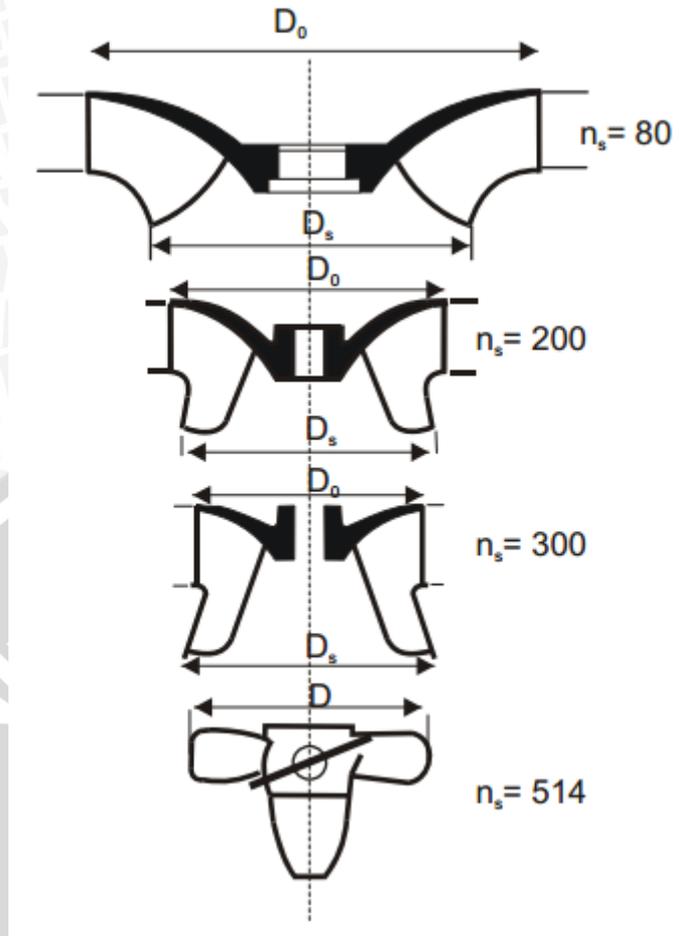
Runner berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik untuk ditransformasikan menjadi energi listrik oleh generator. Pemutar memiliki 2 jenis yaitu runner axial dan runner radial, dengan atau tidak menggunakan movable blade (sudu).

4. Pipa pembuang (*Draft tube*)

Pipa pembuang yang berfungsi untuk menghantarkan aliran dari turbin menuju saluran *tailrace*.

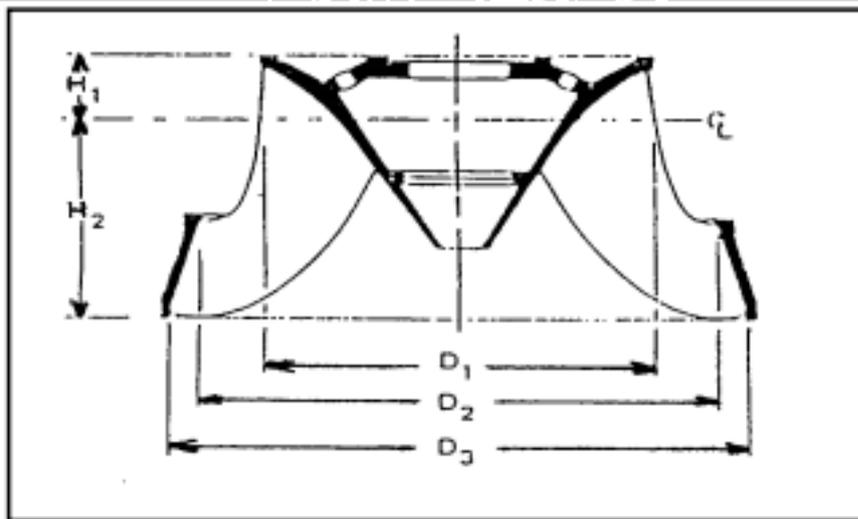
#### **Diameter Runner**

Diameter *runner* untuk turbin reaksi ditentukan atas besarnya kecepatan spesifik, tinggi jatuh dan juga perbedaan kecepatan tangensial pada turbin. Runner turbin biasanya didesain berdasarkan kecepatan spesifik turbin tersebut.



**Gambar 2.25 Pemilihan Bentuk Runner Berdasarkan Kecepatan Spesifik**  
 Sumber: *Penche, 2004:169.*

Untuk turbin francis dimensi runner dihitung dengan persamaan berikut (Ramos, 2000:97):



**Gambar 2.26 Skema Runner Untuk Turbin Francis**  
 Sumber: *Ramos, 2000:97*

$$D_3 = 84.5 \text{ Ku} \frac{\sqrt{H_0}}{n}$$

(2-48)

$$K_u = 0.31 + 2.5 \times 10^{-3} N_s \quad (2-49)$$

$$D_1 = D_3 \left( 0.4 + \frac{94.5}{N_s} \right) \quad (2-50)$$

$$D_2 = \frac{D_3}{0.96 + 0.00038 N_s} \quad (2-51)$$

$$H_1 = D_3 (0.094 + 0.00025 N_s) \quad (2-52)$$

$$H_2 = D_3 \left( -0.05 + \frac{42}{N_s} \right) \quad (2-53)$$

Dimana :

D : diameter *runner* (m)

n : kecepatan dasar turbin (rpm)

N<sub>s</sub> : kecepatan spesifik turbin (kW m)

K<sub>u</sub> : perbedaan kecepatan tangensial

### **Guide Vane**

Karakteristik dimensi *guide vane* dihitung dengan persamaan:

$$B_g = (0.45 - 31.8/N_s) D_M \quad (2-54)$$

$$H_g = 0.2 D_M \quad (2-55)$$

Dimana:

B<sub>g</sub> : tinggi *guide vane* (m)

H<sub>g</sub> : lebar ruang whirl (m)

N<sub>s</sub> : Kecepatan spesifik (kW m)

D<sub>m</sub> : diameter *runner* turbine (m)

### **Rumah Siput (Spiral Case)**

Rumah siput digunakan untuk mengubah energi tekanan menjadi energi kinetik dan sebagai pengarah aliran menuju ruang pemutar turbin. Dimensi rumah siput dinyatakan sebagai berikut (Ramos,2000:98):

$$A = D_3 (1,2 - 19.56 / N_s) \quad (2-56)$$

$$B = D_3 (1,1 + 54.8 / N_s) \quad (2-57)$$

$$C = D_3 (1,32 + 49.25 / N_s) \quad (2-58)$$

$$D = D_3 (1,5 + 48.8 / N_s) \quad (2-59)$$

$$E = D_3 (0.98 + 63.6 / N_s) \quad (2-60)$$

$$F = D_3 (1 + 131.4 / N_s) \quad (2-61)$$

$$G = D_3 (0.89 + 96.5 / N_s) \quad (2-62)$$

$$H = D_3 (0.79 + 81.75 / N_s) \quad (2-63)$$

$$I = D_3 (0,1 + 6.5 \times 10^{-4} N_s) \quad (2-64)$$

$$L = D_3 (0,88 + 4,9 \times 10^{-4} N_s) \quad (2-65)$$

$$M = D_3 (0,6 + 1,5 \times 10^{-5} N_s) \quad (2 - 66)$$

Kecepatan dalam rumas siput dihitung dengan persamaan:

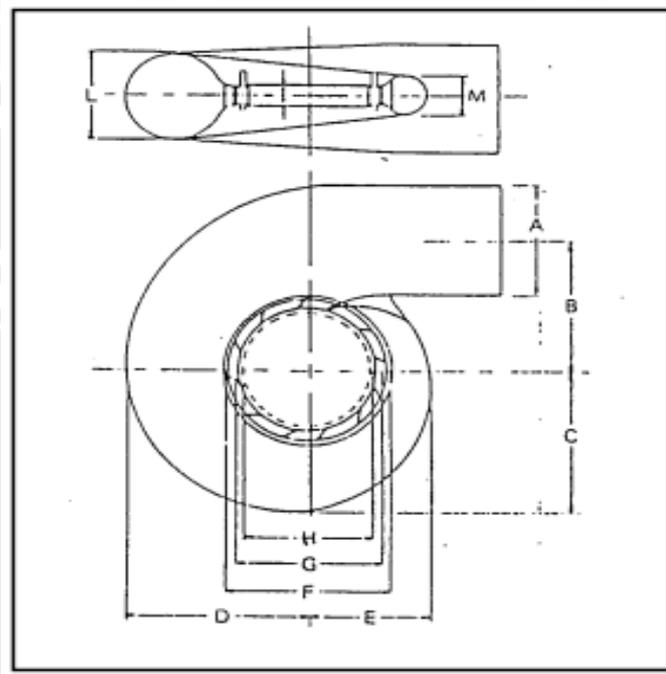
$$V = 488/N_s^{0,44} \quad (2 - 67)$$

Dimana:

$D_m$  : diameter *runner* (m)

$V$  : kecepatan (m/s)

$N_s$  : kecepatan spesifik (mkW)



**Gambar 2.28 Skema Rumah siput (*Spiral Case*)**

Sumber: Ramos,2000:99

#### **Pipa Pelepas (*Draft tube*)**

Pipa pelepas adalah pipa yang meneruskan air dari turbin ke saluran pembuangan (Patty, 1995:97).

Pipa ini mempunyai 2 tujuan yaitu (Patty, 1995:99) :

- Menggunakan tinggi jatuhnya air dari tempat keluar turbin ke muka air saluran pembuangan atau menggunakan tinggi statis.
- Menggunakan energi kinetik air yang keluar dari turbin atau menggunakan tinggi dinamis.

Untuk perencanaan dimensi dari draft tube dapat menggunakan persamaan (Ramos,2000:98) sebagai berikut:

$$N = D_3 (1,54 + 203,5 / N_s) \quad (2 - 68)$$

$$O = D_3 (0,83 + 140,7 / N_s) \quad (2 - 69)$$

$$P = D_3 (1,37 - 5,6 \times 10^{-4} Ns) \quad (2 - 70)$$

$$Q = D_3 (0,58 + 22,6 / Ns) \quad (2 - 71)$$

$$R = D_3 (1,6 - 0,0013 Ns) \quad (2 - 72)$$

$$S = Ns / (-9,28 + 0,25 Ns) \quad (2 - 73)$$

$$T = D_3 (1,5 + 1,9 \times 10^{-4} Ns) \quad (2 - 74)$$

$$Z = D_3 (2,63 + 33,8 / Ns) \quad (2 - 75)$$

Kecepatan pada inlet *draft tube* dihitung dengan persamaan :

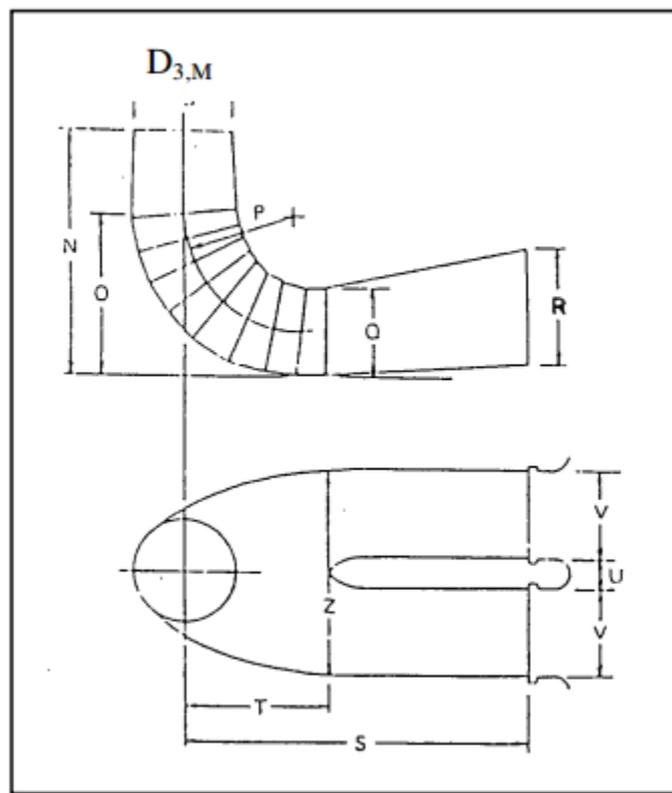
$$V = 8,74 + 2,48 / Ns \quad (2 - 76)$$

Dimana:

$D_m$  : diameter *runner* (m)

$V$  : kecepatan (m/s)

$Ns$  : kecepatan spesifik (mkW)



**Gambar 2.29 Dimensi *Draft Tube* Untuk Turbin Kaplan**

Sumber: Ramos, 2000:99

### 2.13.5. Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin adalah perbandingan antara energi yang keluar dari turbin dan energi yang masuk turbin yang diberikan aliran air. ( Patty, 1995:92) Turbin air moderen dioperasikan pada efisiensi mekanis lebih dari 90% (tidak terpengaruh

efisiensi termodinamika), efisiensi turbin dinyatakan dalam persamaan (Ramos,2000:89):

$$\eta = \frac{P}{\gamma Q H_0} \quad (2 - 77)$$

dimana:

$\eta$  : efisiensi turbin

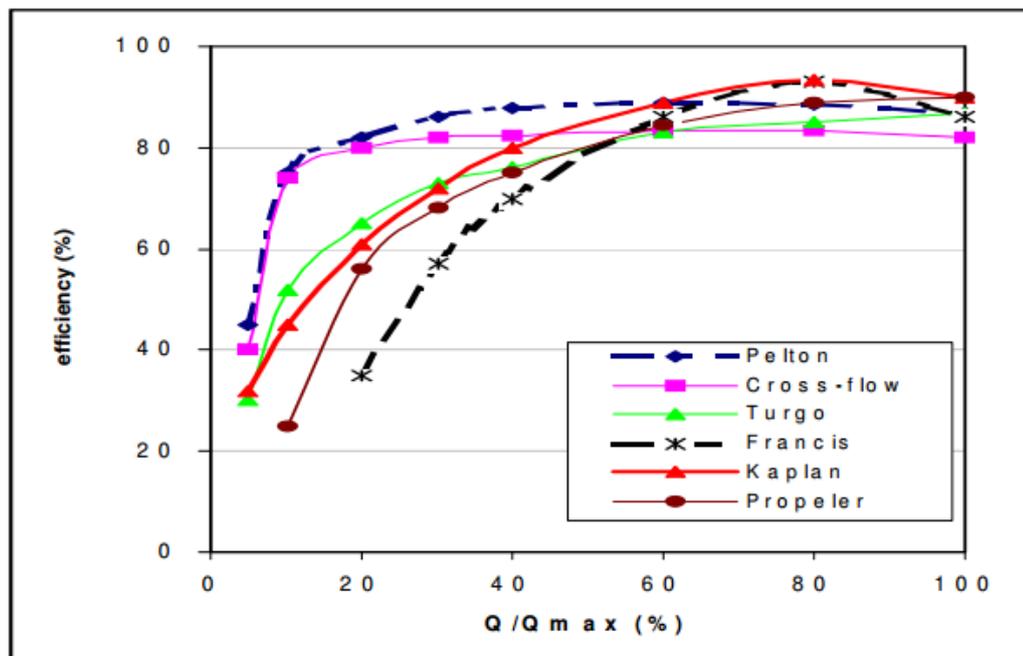
$P$  : daya (watt)

$\gamma$  : berat jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$Q$  : debit ( $\text{m}^3/\text{dt}$ )

$H_0$  : tinggi jatuh (m)

Besaran efisiensi untuk tiap turbin berbeda beda, kisaran efisiensi diperlihatkan dengan gambar berikut:



**Gambar 2.30** Kisaran Nilai Efisiensi Untuk Tiap Jenis Turbin

Sumber: Ramos,2000:99

#### 2.14. Peralatan dan Fasilitas Listrik

Peralatan Listrik merupakan komponen sistem pembangkit listrik yang berfungsi sebagai pengatur daya bangkitan dari turbin untuk disalurkan melalui grid atau jaringan distribusi listrik, tujuan lainnya adalah sebagai pengaman dari sistem pengaturan dan pembangkitan energi listrik.

Perencanaan peralatan elektrik meliputi: perencanaan generator, pengatur kecepatan (*governor*), peningkat kecepatan (*speed increaser*), transformer (travo),

peralatan pengatur elektrik (*switch gear equipment*), dan aksesori kelengkapan elektrik (*electric auxiliary*).

### 2.14.1. Generator

Generator listrik adalah sebuah alat yang memproduksi energy listrik dari sumber energi mekanikal, biasanya dengan menggunakan induksi elektromagnetik. Generator memiliki dua bagian yaitu *rotor* dan *stator*.

Daya keluar generator dapat dihitung dengan persamaan (Penche,2004:187):

$$P_g = \frac{P_t \eta_g}{P_f} \quad (2 - 78)$$

Dimana:

$P_g$  : rating keluaran generator (kVA)

$P_t$  : rating keluaran turbin (kW)

$\eta_g$  : efisiensi generator

$P_f$  : faktor tenaga

Menurut Penche, generator yang digunakan untuk PLTA adalah generator dengan 3 fasa dan jenis generator dibedakan menjadi 2 yakni:

1. generator sinkron  
generator sinkron dilengkapi dengan listrik DC atau permanen magnet eksitasi sistem (berputar atau statis) terkait dengan regulator tegangan untuk mengontrol tegangan output sebelum generator terhubung ke grid. Generator ini menyediakan energi reaktif yang dibutuhkan oleh kekuatan sistem saat generator terhubung ke grid. Generator sinkron dapat menjalankan sistem terisolasi dari grid dan menghasilkan listrik karena eksitasi tidak tergantung-grid
2. generator tak sinkron  
generator ini adalah motor induksi sederhana tanpa kemungkinan regulasi tegangan dan berjalan pada kecepatan berkaitan langsung dengan frekuensi sistem. mereka menarik eksitasi mereka dari grid, menyerap energi reaktif oleh magnet mereka sendiri. Menambahkan bank kapasitor dapat mengimbangi energi reaktif diserap. Mereka tidak bisa menghasilkan ketika terputus dari grid karena tidak mampu menyediakan eksitasi saat ini mereka sendiri. Namun, mereka digunakan dalam aplikasi yang berdiri sendiri yang sangat kecil sebagai solusi murah bila kualitas yang dibutuhkan dari pasokan listrik tidak terlalu tinggi.

Selain itu generator juga memiliki efisiensi sama seperti turbin, efisiensi generator dapat dibedakan berdasarkan keluaran energi yang dihasilkan (Penche,2004:187).

**Tabel 2.5. Hubungan Antara Daya Generator Dengan Effisiensi**

Rated Power (kW)	Best efficiency
10	0,91
50	0,94
100	0,95
250	0,955
500	0,96
1000	0,97

Sumber: (Penche,2004:187).

**Tabel 2.6. Nilai Kecepatan Generator Untuk Generator Sinkron**

jumlah pole	frekuensi		jumlah pole	frekuensi	
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz
2	3000	3600	16	375	450
4	1500	1800	18	333	400
6	1000	1200	20	300	360
8	750	900	22	272	327
10	600	720	24	250	300
12	500	600	26	231	277
14	428	540	28	214	257

Sumber: (Penche,2004:180).

Untuk mengatur tegangan yang keluar dari generator agar dapat distabilkan maka perlu direncanakan pengatur tegangan (*exciter*), terdapat 2 jenis *exciter* yang biasanya digunakan untuk generator yaitu (Penche,2004:188):

- *Static type exciters*
- *Brushless type exciter*
- *Rotating type exciter*

#### 2.14.2. Pengatur Kecepatan

Pengatur kecepatan dibutuhkan untuk pengaturan kecepatan pada turbin dengan mengatur guide vane sehingga didapatkan kecepatan yang masih diijinkan oleh turbin untuk beroperasi, pengatur kecepatan memiliki tiga jenis tipe yakni: hidro – mekanik, mekanik – elektrik dan hidro – elektrik.

Analisa kestabilan pada governor, Penche merekomendasikan bahwa  $t_m/t_w > 4$  dimana  $t_w$  adalah karakteristik aliran pada pipa pesat dan  $t_m$  adalah bagian inersia yang berputar. Analisa kestabilan governor adalah sebagai berikut(Penche,2004:192):

$$T_m : \frac{\Omega R^2 n^2}{5086P} \quad (2 - 79)$$

$$T_w : \frac{\Sigma LV}{gH} \quad (2 - 80)$$

Dimana:

$T_m$  : waktu bagian inersia yang berputar (*machine time constant*) (detik)

$T_w$  : waktu mulai aliran (detik)

$\Omega R$  : keseluruhan bagian unit yang berputar (rpm)

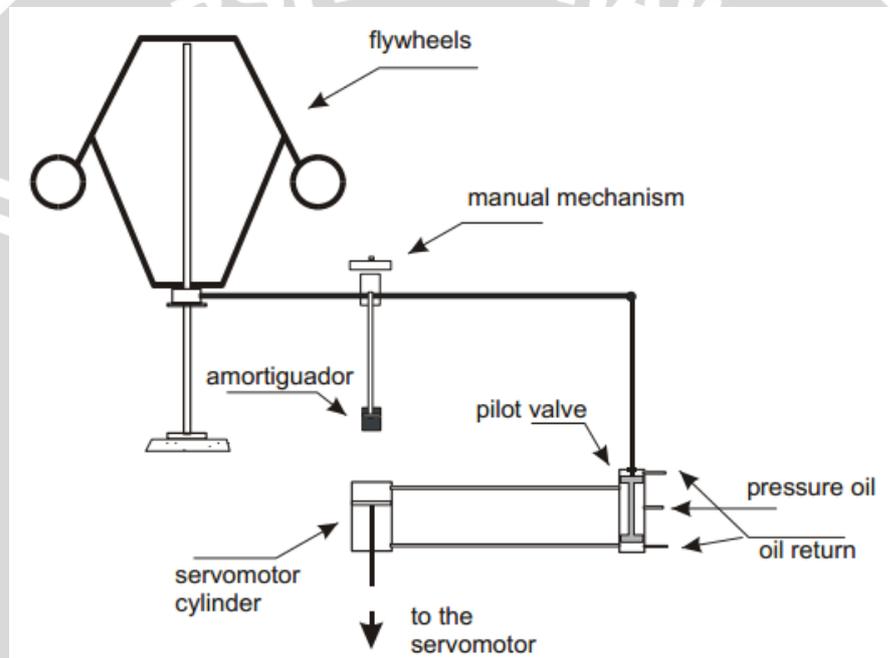
$n$  : kecepatan sinkron turbin (rpm)

$P$  : daya keluaran turbin (kW)

$L$  : panjang jalan aliran (pipa pesat) (m)

$V$  : kecepatan aliran (m/dt)

$H$  : tinggi jatuh (m)



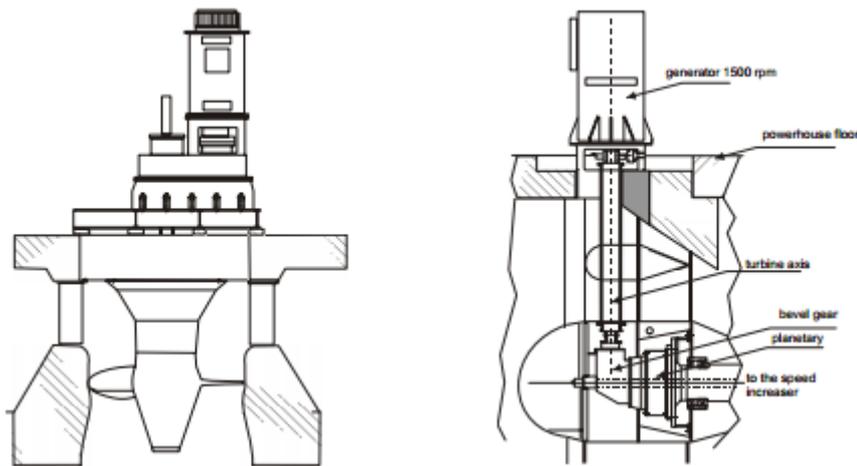
**Gambar 2.31 Pengatur Kecepatan (*Governor*) Tipe Mekanik**  
 Sumber: Penche,2004:190

### 2.14.3. Peningkat Kecepatan (*Speed Increaser*)

Peningkat kecepatan dibutuhkan oleh turbin dengan kondisi tinggi jatuh rendah seperti turbin Kaplan, turbular dan bulb. Peningkat kecepatan agar kecepatan pada turbin bisa stabil dan berjalan maksimal.

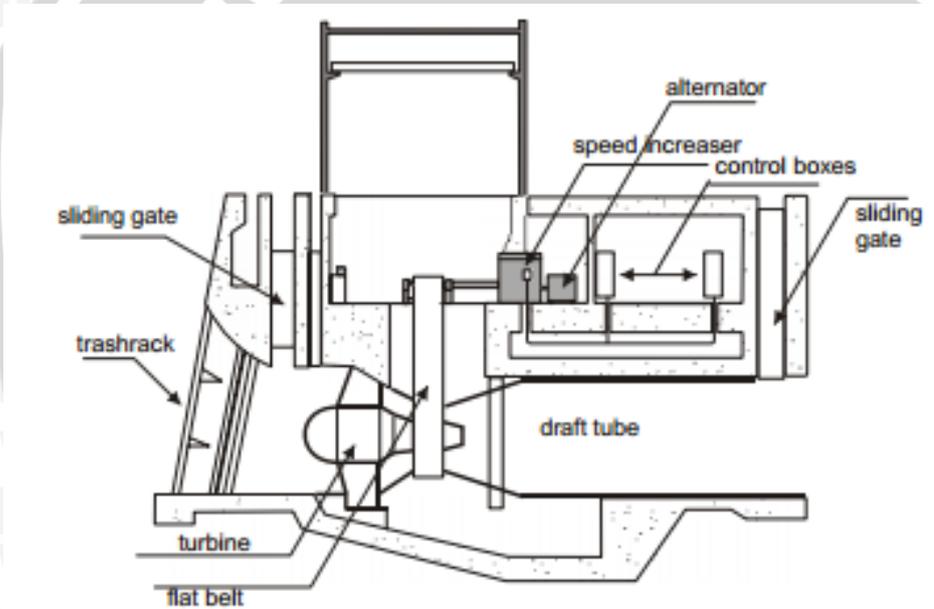
Menurut Penche,2004:184 peningkat kecepatan memiliki beberapa jenis yaitu:

- *Parallel Shaft*
- *Bevel Gears*
- *Belt speed increaser*



**Gambar 2.32 Peningkat Kecepatan Tipe *Parallel Shaft Dan Bevel Gears***

Sumber: *Penche,2004:185*



**Gambar 2.33 Peningkat Kecepatan Tipe *Belt Speed Increaser***

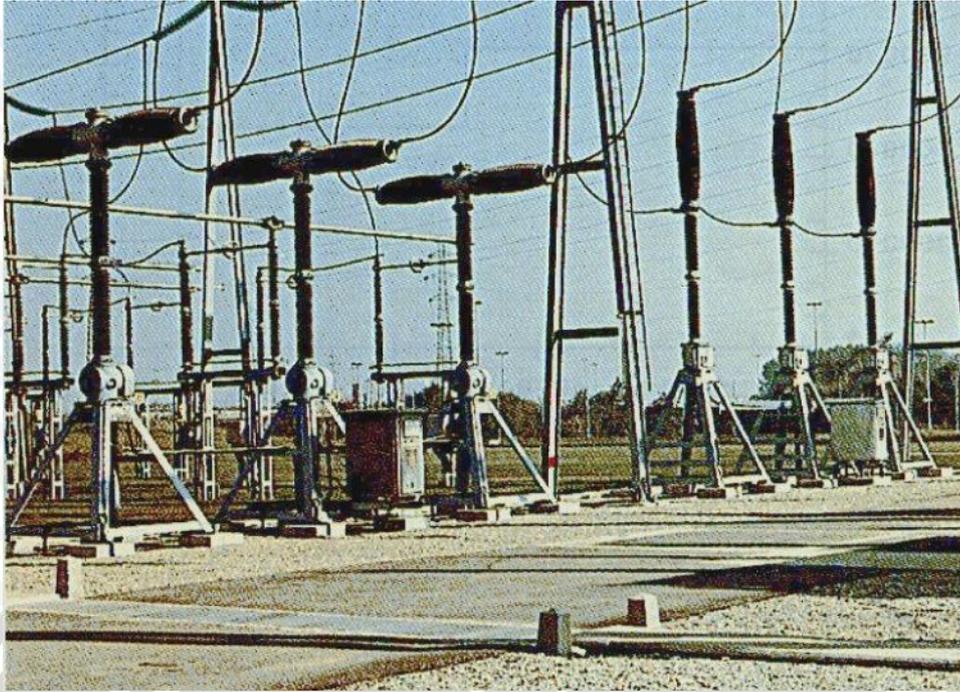
Sumber: *Penche,2004:185*

#### 2.14.4. Transformer (*Travo*)

Sebelum masuk ke jaringan transmisi arus listrik masuk melalui transformer untuk menurunkan intensitas arus yang dihasilkan dan meningkatkan voltase listrik untuk selanjutnya diatur sesuai dengan keperluan domestik.

#### 2.14.5. Peralatan Pengatur (*Switchgear*)

*Switchgear* merupakan kombinasi antara saklar pemutus, *fuse* dan pemutus aliran (*circuit breaker*). *Switchgear* difungsikan untuk melindungi generator dan transformator utama dari bahaya kelebihan kapasitas (*overcapacity*).



**Gambar 2.34 Switchgears**

Sumber: <http://en.wikipedia.org/Switchgear>

#### 2.14.6. Aksesoris Kelengkapan (*Auxiliary Equipment*)

Aksesoris kelengkapan pada sistem pembangkit listrik memiliki peranan sebagai pelengkap dan peralatan bantu untuk sistem pengoperasian dan perawatan sistem pembangkit tenaga listrik.

#### 2.15. Energi

Tenaga yang dihasilkan dari debit pembangkitan maksimum (debit puncak = plant peak discharge) disebut kapasitas terpasang atau installed Capacity. Tenaga yang dihasilkan berupa produksi energi tahunan

Produksi energi tahunan dihitung berdasarkan tenaga andalan. Tenaga andalan dihitung berdasarkan debit andalan yang tersedia untuk pembangkitan energi listrik yang berupa debit outflow dengan periode n harian. (arismunandar,2005:19)

$$E = 9,8 \times H \times Q \times \eta_g \times \eta_t \times 24 \times n \quad (2-81)$$

dimana:

E : Energi tiap satu periode (kWh)

H : Tinggi jatuh efektif (m)

Q : Debit outflow ( $\text{m}^3/\text{dtk}$ )

$\eta_g \eta_t$  : efisiensi turbin dan generator

n : jumlah hari dalam satu periode.

## 2.16. Faktor Dalam Pembangkitan PLTA

### ✓ Faktor Beban

Faktor beban adalah perbandingan antara besarnya beban rata-rata untuk selang waktu tertentu terhadap beban puncak tertinggi dalam selang waktu yang sama (misalnya satu hari atau satu bulan). Sedangkan beban rata-rata untuk suatu selang waktu tertentu adalah jumlah produksi kwh dalam selang waktu tersebut dibagi dengan jumlah jam dari selang waktu tersebut.

$$\text{Faktor beban} = \frac{\text{beban rata-rata}}{\text{beban puncak}}$$

Faktor beban tahunan sistem berkisaran 60%-80%

### ✓ Faktor Kapasitas

Faktor kapasitas sebuah unit pembangkit menggambarkan seberapa besar sebuah unit pembangkit itu dimanfaatkan. Faktor kapasitas tahunan (8760 jam) didefinisikan sebagai :

$$\text{Faktor kapasitas} = \frac{\text{Produksi kwh setahun}}{\text{daya terpasang Mw} \times 8760 \text{ jam}}$$

Dalam prakiraannya faktor kapasitas tahunan berkisar 30%-50%, hal ini karena berkaitan dengan ketersediaan air.

### ✓ Faktor Penggunaan (Utilitas)

Faktor ini sesungguhnya sama dengan faktor kapasitas, tetapi disini menyangkut daya. Faktor utilitas sebuah alat dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\text{Faktor Utilitas} = \frac{\text{Beban alat yang tertinggi}}{\text{kemampuan alat}}$$

## 2.17. Sistem Operasi PLTA

Sistem operasi PLTA dilakukan dengan 2 metode yaitu: sistem operasi terpusat (*central grid*) dan sistem operasi terisolasi (*isolated grid*).

Sistem terpusat (*central grid*) adalah sistem pengoperasian PLTA yang dikelola secara terpusat oleh perusahaan distributor listrik dalam hal ini adalah PT PLN sehingga tidak ada regulasi khusus yang harus dilakukan dikarenakan pengaturan listrik dilakukan secara terpusat dari tiap tiap transmisi jadi PLTA bisa beroperasi terus menerus. Operasi sistem terpusat biasanya dilakukan oleh PLTA tanpa tandon dikarenakan tidak adanya tampungan untuk memenuhi kebutuhan beban puncak (*peak load*).

Sistem terisolasi (*isolated grid*) adalah sistem pengoperasian PLTA yang tidak melalui jaringan distribusi perusahaan distributor listrik (PT PLN), jadi harus

direncanakan adanya sistem pengaturan operasi berdasarkan kebutuhan beban tiap jam untuk memenuhi kebutuhan layanan, biasanya sistem terisolasi digunakan untuk PLTA dengan tandon atau PLTA yang terletak jauh dari transmisi grid PLN.

### 2.18. Analisa Emisi Gas Karbon (*Green House Gas Emission*)

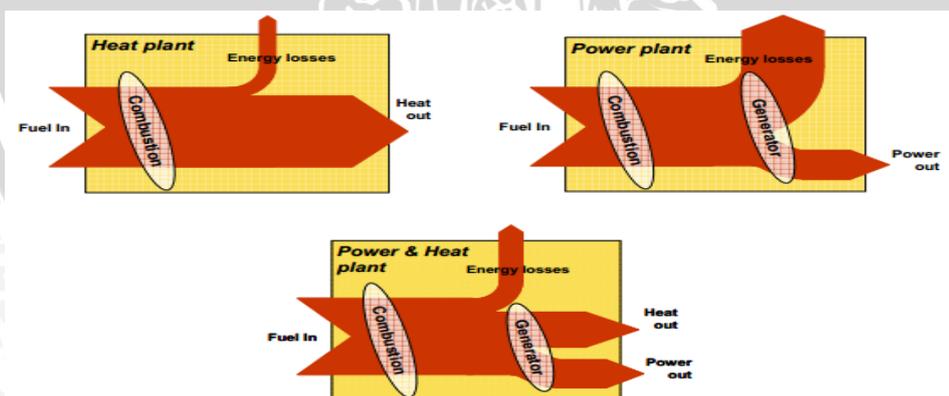
Emisi gas karbon ( $\text{CO}_2$ ) merupakan polutan hasil pembakaran bahan bakar seperti minyak, batu bara, dan bahan bakar fosil lainnya. Dalam pembangkitan energi listrik dengan menggunakan sumber energi dengan bahan bakar fosil akan memberikan polutan gas karbon ( $\text{CO}_2$ ) dengan kuantitas tertentu berdasarkan faktor emisi gas karbon untuk tiap kilowatt yang dihasilkan dari proses pembangkitan energi pada generator sampai disalurkan pada grid.

Berikut adalah nilai faktor emisi gas karbon untuk tiap jenis sumber energi atau bahan bakar:

**Tabel 2.7. Nilai Faktor Emisi Gas Karbon Untuk Tiap Jenis Bahan Bakar**

No.	Jenis Bahan Bakar (Sumber Energi)	Kg $\text{CO}_2/\text{kWh}$
1	Minyak	0,754
2	Diesel	0,764
3	Tenaga Air ( <i>Hydro</i> )	0
4	Panas Bumi ( <i>Geothermal</i> )	0
5	Batu Bara ( <i>Coal</i> )	0,94
6	Gas Alam ( <i>Natural Gas</i> )	0,581

Sumber: *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006*  
\*Chevron Indonesia 2012



**Gambar 2.35 Proses Pembakaran Bahan Bakar Dalam Pembangkitan Energi Listrik**

Sumber: *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006*

#### 2.18.1. Clean Development Mechanism (CDM) dan Certificate Emission Reduction (CER)

CDM adalah proyek mekanisme untuk mengurangi emisi gas karbon sesuai dengan protokol Kyoto tahun 1998, dimana CDM dilakukan diberbagai bidang seperti

industri, transportasi, energi, dan bentuk bidang penghasil karbon lainnya. di Indonesia telah didirikan badan khusus untuk penanganan DNA-Indonesia atau Komisi Nasional-Mekanisme pembangunan Bersih (Komnas MPB) pada tingkat nasional dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 206 Tahun 2005. Komnas MPB ini akan berperan dalam pemberian persetujuan pada setiap dokumen desain proyek (Project Design Document) sebelum disetujui oleh Badan Eksekutif di tingkat internasional (Executive Board). Komnas MPB akan secara khusus memberikan penilaian dan persetujuan berkenaan dengan kriteria pembangunan berkelanjutan.

Kriteria untuk pengajuan proyek CDM meliputi:

1. Kriteria Lingkungan Yang Berkelanjutan

Indikator: perawatan kondisi fungsi ekologi, penerapan standar pengelolaan lingkungan, pemeliharaan flora dan fauna pada ekosistem termasuk tidak terjadi kontaminasi, mempertahankan pola tata guna lahan, dan tidak ada resiko kesehatan yang disebabkan proyek.

2. Kriteria Ekonomi yang berkelanjutan

Indikator: tidak mengurangi pendapatan daerah, proyek harus menambah potensi pendapatan daerah, tidak mengurangi layanan publik.

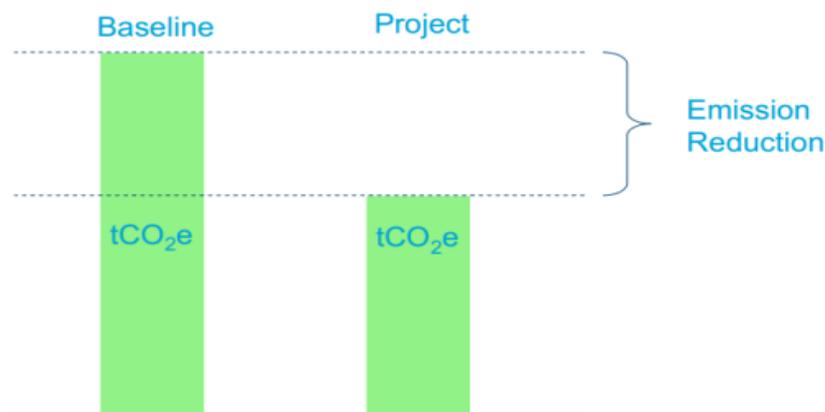
3. Kriteria Sosial Yang Berkelanjutan

Indikator: masyarakat dapat merasakan dan berpartisipasi dari hasil pembangunan proyek.

4. Kriteria Teknologi Yang Berkelanjutan

Indikator: tidak terlalu menggantungkan terhadap teknologi asing, tidak menggunakan energi yang belum matang, dan meningkatkan teknologi dan kemampuan daerah.

Dengan adanya CDM maka dapat membantu Negara berkembang untuk mencapai pengembangan teknologi yang berkelanjutan dengan mengizinkan pihak pengembang (*developers*) untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GHG) dan mendapatkan bantuan dana dengan melakukan hal tersebut.



**Gambar 2.36 Prinsip Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca Dengan CDM**

Sumber: [www.pwc.com/energy-utilities-mining-assets-the-clean-development-mechanism-indonesia.pdf](http://www.pwc.com/energy-utilities-mining-assets-the-clean-development-mechanism-indonesia.pdf)

CER adalah sertifikat pengakuan untuk sebuah proyek atau sebuah usaha dikarenakan telah melakukan pengurangan emisi gas rumah kaca. Besarnya nilai CER tiap 1 tCO<sub>2</sub>e adalah sebesar 11 euro atau setara dengan 172,429.20 rupiah (Chugoku Electric Power, 2009:6-7). Besarnya reduksi emisi gas karbon yang dihasil dari pembangkitan energi listrik dapat dihitung dengan persamaan berikut (Anonim dalam RETScreen, 2005:53):

$$\Delta_{\text{GHG}} : (e_{\text{base}} - e_{\text{prop}}) E_{\text{prop}} (1 - \lambda_{\text{prop}}) \quad (2-82)$$

Dimana:

$\Delta_{\text{GHG}}$  : Besaran reduksi gas karbon ( kgCO<sub>2</sub>e )

$e_{\text{base}}$  : faktor emisi gas karbon dari sumber tidak terbarukan (lihat tabel 2.7)

$e_{\text{prop}}$  : faktor emisi gas karbon dari sumber terbarukan ( $e_{\text{prop}} = 0$  untuk tenaga air)

$E_{\text{prop}}$  : besarnya daya bangkitan (kWh)

$\lambda_{\text{prop}}$  : kehilangan daya pada unit distribusi / grid

## 2.19. Analisa Kelayakan Ekonomi

Analisa ekonomi dilakukan untuk mengetahui kelayakan suatu proyek dari segi ekonomi. Dalam melakukan analisa ekonomi dibutuhkan dua komponen utama yaitu: *cost* (komponen biaya) dan *benefit* (komponen manfaat).

### 2.19.1. Komponen Manfaat dan Biaya

#### A. Komponen Manfaat

Menurut Suyanto (2001:65) manfaat yang diperhitungkan dalam analisa ekonomi adalah manfaat yang termasuk dalam kategori "*direct and tangible benefit*" yaitu manfaat yang langsung dapat dinikmati oleh penerima manfaat (misalnya petani)

dan yang dapat dinilai dengan uang. Manfaat yang dapat diperoleh dari PLTA adalah uang hasil penjualan listrik kepada konsumen didasarkan pada tenaga listrik yang dihasilkan tiap tahun dan tarif dasar listrik yang berlaku.

$$B = E \cdot \text{TDL} \quad (2-83)$$

dengan :

B = benefit (Rp)

E = energi (kWh)

TDL = tarif dasar listrik (Rp/kWh)

## B. Komponen Biaya

Biaya modal (*Capital Cost*) adalah jumlah semua pengeluaran yang dibutuhkan mulai dan pra studi sampai proyek selesai dibangun. Semua pengeluaran yang termasuk biaya modal dibagi menjadi dua bagian yaitu biaya langsung dan biaya tak langsung

### • Biaya Langsung

Biaya ini merupakan biaya yang diperlukan untuk pelaksanaan pembangunan atau biaya konstruksi. Biaya konstruksi PLTA dinyatakan dalam rumus empiris yang diperkirakan dengan harga satuan dari proyek-proyek PLTA di Indonesia. Biaya konstruksi sebagai fungsi *cost* yang diperhitungkan.

Rumus empiris yang digunakan untuk memperkirakan besarnya biaya adalah sebagai berikut (Anonim dalam RETScreen, 2005: Appendix B):

#### 1. biaya *engineering* (C1)

biaya *engineering* merupakan biaya yang diperlukan untuk jasa konsultasi dan jasa konstruksi, persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C1 = 0,37 n^{0,1} E \left( \frac{MW}{Hg^{0,3}} \right)^{0,54} \times 10^6 \quad (2-84)$$

Dimana:

C1 : estimasi biaya *engineering* (\$ Kanada)

n : jumlah turbin yang digunakan

E : *engineering cost factor* (0,67 jika ada bendungan / bendung eksisiting dan 1 jika tidak ada bendungan / bendung eksisiting)

MW : total kapasitas terpasang (MegaWatt)

H<sub>g</sub> : tinggi jatuh kotor (m)

#### 2. biaya peralatan hidromekanik (C2)

biaya peralatan hidromekanik meliputi biaya generator, turbin dan governor, persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C2 = CG + CT \quad (2-85)$$

Generator

$$CG = 0,82 n^{0,98} G C_g \left( \frac{MW}{Hg^{0,28}} \right)^{0,9} \times 10^6 \quad (2-86)$$

Turbin Francis

$$CT = 0,17 n^{0,96} J_t K_t d^{1,47} ((13 + 0,01H_g^{0,3}) + 3) \times 10^6 \quad (2-87)$$

Dimana:

C2 : estimasi biaya hidromekanik(\$ Kanada)

CG : biaya generator (\$ Kanada)

CT : biaya turbin dan governor (\$ Kanada)

G : faktor koneksi grid (0,9 untuk central grid)

C<sub>g</sub> : faktor motor generator kecil ( 0,75 jika MW < 10, 1 jika MW > 10)

J<sub>t</sub> : Faktor peningkatan tinggi jatuh (1 jika H < 25m, 1,1 jika H > 25m)

K<sub>t</sub> : faktor penurunan diameter kecil (0,9 jika d < 1,8m , 1 jika d > 1,8m)

d : diameter runner turbin (m)

Mwu : kapasitas daya tiap turbin (Megawatt)

### 3. biaya instalasi peralatan hidromekanik (C3)

merupakan biaya pemasangan peralatan hidromekanik persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C3 = C2 \times 0,15 \quad (2-88)$$

Dimana:

C3 : estimasi biaya instalasi hidromekanik(\$ Kanada)

C2 : biaya peralatan hidromekanik (\$ Kanada)

### 4. biaya instalasi transmisi jaringan (C4)

merupakan biaya untuk pembangunan jaringan transmisi listrik persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C4 = 0,0011 D P L_t^{0,95} V \times 10^6 \quad (2-89)$$

Dimana:

C4 : estimasi biaya instalasi transmisi jaringan(\$ Kanada)

D : koefisien tingkat kesulitan wilayah (*terrain*) (1 – 2)

V : voltase jaringan transmisi (kV)

P : faktor biaya tiang listrik (0,85 jika V < 69, 1 jika V > 69)

L<sub>t</sub> : panjang jaringan (km)

### 5. biaya substansi dan travo (C5)

merupakan biaya untuk substansi dan transformer (Travo), persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C5 = (0,025 n^{0,95} + 0,002 (n+1) \left(\frac{MW}{0,95}\right)^{0,9} x V^{0,3}) x 10^6 \quad (2-90)$$

Dimana:

C5 : estimasi biaya travo dan substansi(\$ Kanada)

6. biaya pemasangan substansi dan travo (C6)

merupakan biaya untuk substansi dan transformer (Travo), persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C6 = 0,15 C5 \quad (2-91)$$

Dimana:

C6 : estimasi biaya pemasangan substansi dan travo (\$ Kanada)

7. Biaya pekerjaan sipil (C7)

biaya pekerjaan sipil meliputi pekerjaan: galian, timbunan, pembongkaran DLL, persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C7 = 1,97 n^{-0,04} C R \left(\frac{MW}{Hg^{0,3}}\right)^{0,82} (1 + 0,001L_b) 10^6 \quad (2-92)$$

Dimana:

C7 : estimasi biaya pekerjaan sipil (\$ Kanada)

C : koefisien pekerjaan sipil (0,44 jika ada bendungan / bendung eksisting, 1 jika tidak ada bendungan / bendung eksisting)

R : faktor batuan (1 jika terdapat batuan, 1,05 jika tidak terdapat batuan)

L<sub>b</sub> : jarak menuju *borrow area* (m)

8. Biaya pekerjaan pipa pesat (C8)

Merupakan biaya untuk pembangunan pipa pesat, persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C8 = 20 n_p^{0,95} W^{0,88} \quad (2-93)$$

$$W = (24,7 d_p l_p t_{ave}) \quad (2-94)$$

$$d_p = \frac{\left(\frac{Qd}{Np}\right)^{0,43}}{Hg^{0,14}} \quad (2-95)$$

$$t_b = d_p^{1,3} + 6 \quad (2-96)$$

$$t_b = 0,0375 d_p H_g \quad (2-97)$$

$$t_{ave} = 0,5(t_t + t_b) \quad (\text{jika } t_b > t_t) \quad (2-98)$$

$$t_{ave} = t_t \quad (\text{jika } t_b < t_t) \quad (2-99)$$

Dimana:

C8 : estimasi biaya pipa pesat(\$ Kanada)

$n_p$  : jumlah pipa pesat

W : berat pipa pesat (kg)

$Q_d$  : debit desain ( $m^3/dt$ )

$d_p$  : diameter pipa pesat (m)

$l_p$  : panjang pipa pesat (m)

$t_{ave}$  : tebal pipa pesat rata-rata (mm)

$t_t$  : tebal pipa pesat pada intake (mm)

$t_b$  : tebal pipa pesat pada turbin (mm)

#### 9. Biaya pemasangan pipa pesat (C9)

Merupakan biaya untuk ekskavasi dan pemasangan pipa pesat, persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C9 = 5 W^{0,88} \quad (2-100)$$

Dimana:

C9 : estimasi biaya pemasangan pipa pesat(\$ Kanada)

#### 10. Biaya pekerjaan terowongan (C10)

Merupakan biaya untuk pembuatan terowongan termasuk bahan untuk pasangan, persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C10 = 400 R_v^{0,88} + 4000 C_v^{0,88} \quad (2-101)$$

$$R_v = 0,185 l_t^{1,375} \left( \frac{Q_d^2}{k H_g} \right)^{0,375}$$

$$C_v = 0,306 R_v T_c$$

Dimana:

C10 : estimasi biaya pekerjaan saluran(\$ Kanada)

$R_v$  : Volume galian tanah ( $m^3$ )

$C_v$  : Volume beton ( $m^3$ )

$l_t$  : panjang jalur transmisi (km)

$Q_d$  : debit desain ( $m^3/dt$ )

k : koefisien keuangan daerah

$H_g$  : Tinggi jatuh efektif (m)

$T_c$  : Rasio kekuatan tanah

#### 11. Biaya pekerjaan surge tanks (C11)

Merupakan biaya untuk pembuatan surge tanks termasuk bahan untuk pasangan, persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C_{11} = 400 R_v^{0,88} + 4000 C_v^{0,88} \quad (2 -102)$$

$$R_v = 0,185 l_t^{1,375} \left( \frac{Q_d^2}{k H_g} \right)^{0,375}$$

$$C_v = 0,306 R_v T_c$$

Dimana:

$C_{11}$  : estimasi biaya pekerjaan saluran(\$ Kanada)

$R_v$  : Volume galian tanah ( $m^3$ )

$C_v$  : Volume baja ( $m^3$ )

$l_t$  : panjang jalur transmisi (km)

$Q_d$  : debit desain ( $m^3/dt$ )

$k$  : koefisien keuangan daerah

$H_g$  : Tinggi jatuh efektif (m)

$T_c$  : Rasio kekuatan tanah

## 12. Biaya pekerjaan lain lain ( $C_{12}$ )

Merupakan kelompok bangunan lain yang tidak tergolong utama (pelengkap), persamaan empiris untuk estimasi biaya adalah sebagai berikut:

$$C_{12} = 0,25 i Q_d^{0,35} \times 1,1 \sum C_1 \text{ to } C_{10} + 0,1 \sum C_1 \text{ to } C_{10} \quad (2 -103)$$

dimana:

$C_{11}$  : estimasi biaya pekerjaan lain lain(\$ Kanada)

$i$  : suku bunga

Hasil estimasi biaya langsung (*Cost*) dinyatakan dalam satuan mata rupiah dolar Kanada dengan nilai konversi ke mata uang rupiah adalah Rp. 10910,58 per Mei 2015. Sehingga biaya langsung adalah penjumlahan dari seluruh item pekerjaan yang tercantum diatas.

### • Biaya Tak Langsung

Biaya ini dibagi menjadi tiga komponen, yaitu:

#### 1. Kemungkinan/hal yang tidak diduga (*contingencies*) dari biaya langsung.

Kemungkinan/hal yang tidak pasti ini bila dikelompokkan dapat dibagi menjadi tiga, yaitu :

- a. Biaya/pengeluaran yang mungkin timbul, tetapi tidak pasti.
- b. Biaya yang mungkin timbul, namun belum terlihat.

- c. Biaya yang mungkin timbul, akibat tidak tetapnya pada waktu yang akan datang (misal adanya kenaikan harga) atau eskalasi. Biasanya biaya untuk ini merupakan suatu angka prosentase dari biaya langsung, misalnya 5%, 10%, 15%. Hal ini sangat tergantung pada pihak pemilik dan perencana. Semakin berpengalaman pemilik atau perencana, besarnya prosentase ini lebih kecil.
2. Biaya teknik/engineering cost mencakup biaya untuk kegiatan yang terkait dengan aspek engineering yaitu biaya survey lapangan, studi kelayakan (feasibility study), jasa konsultan, desain dan biaya supervisi. (Suyanto, 2001:45)
3. Bunga (interest) selama konstruksi dimaksudkan untuk membayar bunga uang yang harus disediakan. Pajak kadang-kadang perlu ditambahkan atau tidak diperhitungkan. (Suyanto, 2001:46)

### C. Biaya Tahunan

Biaya tahunan adalah biaya yang masih diperlukan sepanjang umur proyek.

Biaya tahunan (A) terdiri dari tiga komponen, yaitu:

- a. Biaya bunga, biaya ini merupakan penyebab terjadinya perubahan biaya modal karena adanya tingkat suku bunga selama umur proyek. Besarnya bisa berbeda dengan bunga selama waktu dari ide sampai pelaksanaan sifat fisik selesai. Bunga merupakan komponen terbesar yang diperhitungkan terhadap biaya modal.
- b. Depresiasi atau penyusutan adalah turunnya suatu harga/nilai dari sebuah benda karena pemakaian dan kerusakan atau keusangan benda itu. Amortisasi adalah pembayaran dalam suatu periode tertentu (tahunan misalnya) sehingga hutang yang ada akan terbayar lunas pada akhir periode tersebut.
- c. Amortisasi adalah pembayaran dalam suatu periode tertentu (tahunan misalnya) sehingga hutang yang ada akan terbayar lunas pada akhir periode tersebut.
- d. Biaya operasi dan pemeliharaan, untuk dapat memenuhi umur proyek sesuai dengan yang direncanakan pada detail desain, maka diperlukan biaya untuk operasi dan pemeliharaan proyek tersebut yang harus dikeluarkan setiap tahunnya. Besarnya biaya O&P diperkirakan dari prosentase biaya modal. Persentase tersebut besarnya berbeda-beda tergantung jenis bangunannya.

### 2.19.2. Indikator Kelayakan Ekonomi

Suatu proyek dikatakan layak secara ekonomi apabila memenuhi indikator-indikator kelayakan ekonomi. Menurut Suyanto (2001:39), indikator yang umum dipakai dalam analisa ekonomi diantaranya:

- Perbandingan manfaat dan biaya (*BCR*)
- Selisih manfaat dan biaya (*Net Present Value*)
- Tingkat pengembalian internal (*Internal Rate of Return*)

#### **BCR (Benefit Cost Ratio)**

Benefit Cost Ratio (*BCR*) adalah perbandingan antara nilai sekarang (*present value*) dari manfaat (*benefit*) dengan nilai sekarang (*present value*) dari biaya (*cost*). Secara umum rumus untuk perhitungan *BCR* ini adalah (Suyanto, 2001:39):

$$BCR = \frac{PV \text{ dari manfaat}}{PV \text{ dari biaya capital dan O\&P}} \quad (2-104)$$

dengan :

PV = Present value

*BCR* = *Benefit Cost Ratio*

Sebagai ukuran dari penilaian suatu kelayakan proyek dengan metode *BCR* ini adalah jika  $BCR > 1$  maka proyek dikatakan layak dikerjakan dan sebaliknya jika nilai  $BCR < 1$  proyek tersebut secara ekonomi tidak layak untuk dibangun.

#### **NPV (Net Present Value)**

Komponen *cost* dan *benefit* dihitung *present valuenya* berdasarkan *discount rate/interest rate* yang telah ditentukan. Harga *Net Present Value* diperoleh dari pengurangan *Present Value* komponen *benefit* dengan *Present Value* komponen *cost* (Suyanto, 2001:39).

$$NPV = PV \text{ komponen Benefit} - PV \text{ komponen Cost} \quad (2-105)$$

dengan :

PV = Present value

*NPV* = *Net Present Value*

Suatu proyek dikatakan ekonomis dan layak dibangun apabila *NPV* bernilai positif atau  $NPV > 0$ .

#### **IRR (Internal Rate Of Return)**

*IRR* merupakan nilai suku bunga yang diperoleh jika *BCR* bernilai sama dengan 1, atau nilai suku bunga jika *NPV* bernilai sama dengan 0. *IRR* dihitung

atas dasar penerimaan bersih dan total nilai untuk keperluan investasi. Nilai IRR sangat penting diketahui untuk melihat sejauh mana kemampuan proyek ini dapat dibiayai dengan melihat nilai suku bunga pinjaman yang berlaku. Perhitungan nilai IRR ini dapat diperoleh cara coba-coba pada tingkat suku bunga tertentu maka didapat BCR =1 ataupun dengan rumus sebagai berikut (Suyanto, 2001):

$$IRR = I' + \frac{NPV'}{NPV' - NPV''} (I'' - I') \quad (2-106)$$

Dimana :

$I'$  = suku bunga memberikan nilai NPV positif

$I''$  = suku bunga memberikan nilai NPV negatif

NPV = selisih antara present value dari manfaat dari present value dari biaya

NPV' = NPV positif

NPV'' = NPV negatif

### 2.19.3. Usia Guna Suatu Proyek

Usia guna bangunan sangat bervariasi tergantung tingkat kepekaan terhadap kerusakan, jenis material yang digunakan dan fungsi bangunan itu tersendiri, PLTA memiliki komponen yang bervariasi mulai dari beton, besi, peralatan mekanik dan elektrik. Untuk memperpanjang usia guna biasanya dilakukan perawatan secara berkala. Usia guna komponen bangunan PLTA ditabelkan sebagai berikut:

**Tabel 2.8. Usia Guna Jenis Bangunan Atau Peralatan Pembangkit Listrik**

Jenis Material	Usia (Tahun)	Jenis Material	Usia (Tahun)
kayu	15	baja (< 4 inch)	30
saluran	75	baja (< 4 inch)	40
kolam pengendapan	50	PLTU/PLTG	28
peralatan konstruksi	5	generator:	
bendung:		> 3000 KVA	28
krib	25	1000 - 3000 KVA	25
benton, pasangan batu, urugan	150	50 hp - 1000KVA	17 - 25
batu lepas	60	< 50 hp	14 - 17
baja	40	hydrant	50
penyaring (filter)	50	pengukur air (AWLR)	30
flumes:		PLTN	20
beton	75	pompa	18 - 25
baja	50	reservoir	75
pipa besar	50	standpipes	50
pipa:		kolam:	
cast iron (2-4 inch)	50	beton	50

Jenis Material	Usia (Tahun)	Jenis Material	Usia (Tahun)
cast iron (4-6 inch)	65	baja	40
cast iron (8-10 inch)	75	kayu	20
cast iron (> 12 inch)	100	terowongan	100
beton	20 - 30	turbin hidrolik	35
PVC	40	sumur	40- 50

Sumber: *Linsley,1986:44*

## 2.20. Perangkat Lunak Dalam Perencanaan PLTA

### 2.20.1. TURBN PRO

#### Definisi TURBN PRO

TURBN PRO merupakan program untuk mengolah data teknis dan melakukan pengukuran dan penggambaran turbin air. Beberapa data yang berhubungan dengan keadaan lokasi turbin tersebut bekerja dimasukkan, juga parameter-parameter operasi dan susunan peralatan yang di inginkan. Setelah itu, terdapat beberapa pilihan ukuran, kecepatan, batas operasi, dimensi, dan karakteristik dayaguna dari solusi turbin yang sesuai dengan data yang dimasukkan. Selain itu, TURBN PRO dapat digunakan untuk menentukan perkiraan produksi energi selama satu tahun dari satu atau beberapa solusi turbin yang dibuat.



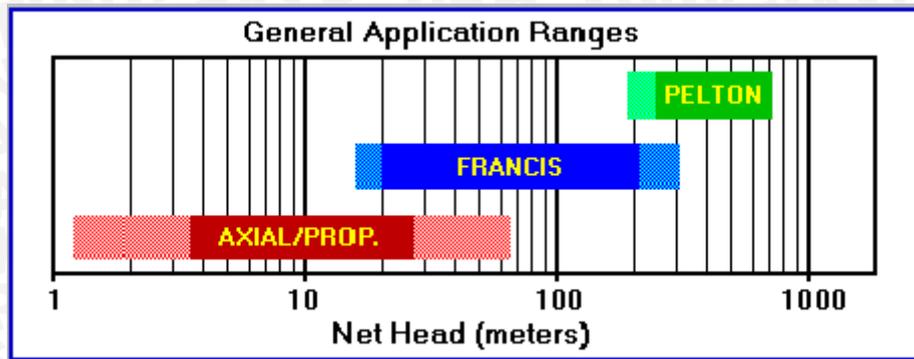
**Gambar 2.37 Tampilan Awal TURBNPRO V3**

#### Software dan Data

Tahapan pengoperasian TURBNPRO meliputi:

1. Penentuan tipe turbin yang akan digunakan

Penentuan tipe turbin merupakan hal yang paling mendasar dalam perencanaan turbin, TURBNPRO merekomendasikan pemilihan turbin berdasarkan gambar berikut:



Gambar 2.38 Grafik Pemilihan Tipe Turbin

2. Input data

Input data meliputi data debit, tinggi jatuh efektif, frekuensi generator DLL, untuk lebih jelas akan ditunjukkan pada gambar berikut:

The screenshot shows the 'TURBNPRO 3: Axial/Propeller Turbine Sizing Routine (Data Entry Form)' window. It features a title bar with 'Continue', 'Clear Entries', and 'Cancel' buttons. The main area contains the following input fields:

- Rated Discharge (in m<sup>3</sup>/s)
- Net Head at rated discharge (in meters and < 67)
- Site Gross Head (in meters)
- Site Elevation (in meters)
- Water Temperature (in degrees C)
- Desired setting to tailwater (in meters)
- Efficiency Priority at max output (0 to 10)
- Ratio of rated head to best eff head (0.7 to 1.0)
- System Frequency (50 Hz or 60 Hz)
- Minimum Net Head (in meters)

Gambar 2.39 Tampilan Input Data TURBNPRO V3

### 3. Pemilihan alternatif solusi

TURBNPRO akan melakukan simulasi tentang banyaknya kemungkinan alternatif desain turbin yang akan digunakan, ada 10 alternatif desain yang diberikan berdasarkan nilai diameter turbin, kecepatan spesifik dan kecepatan putar turbin.

Solution Number	Runner Diameter Millimeters	Runner Diameter Inches	Unit Speed rpm	Specific Speed NS	Centerline Setting meters
1	1545	60.8	272.7	669	2.1
2	1602	63.1	250.0	614	3.3
3	1660	65.4	230.8	566	4.2
4	1717	67.6	214.3	526	5.0
5	1775	69.9	200.0	491	5.7
6	1832	72.1	187.5	460	6.2
7	1890	74.4	176.5	433	6.7
8	1948	76.7	166.7	409	7.1
9	2005	78.9	157.9	387	7.5
10	2063	81.2	150.0	368	7.7

Preliminary Output: **636 KW**

Enter Size Selection:

**Gambar 2.40 Tampilan Alternatif Solusi TURBNPRO V3**

### 4. Pengaturan turbin

Setelah melakukan pemilihan alternatif desain turbin yang akan digunakan maka selanjutnya adalah melakukan pengaturan turbin, pengaturan turbin meliputi: *unit arrangement*, *unit orientation*, *turbin regulation* dan *efficiency modifier*.

TURBNPRO 3: Axial/Propeller Configure Turbine Routine

Runner Diameter: **1545 mm**  
Speed: **272.7 rpm**

1) Unit Arrangement:   
 Tubular  Pit / Bulb, Horiz. Axis  Radial, Vertical Axis

2) Unit Orientation:  Upstream Orientation:  Intake Type:   
 Horizontal  Vertical  Pit Type  Bulb Type  Spiral Case  Semi-Spiral Case  Flume

3) Turbine Regulation Type:   
 Kaplan  Adjustable Blade/Fixed Vane  Adjustable Gate/Fixed Blade

4) Efficiency Modifier (User Option)   
Multiplier -  (0.98 to 1.02)  
Flow<sup>2</sup> Function -  (-0.01 to +0.01)

Comments:  
The specific speed of the size selected is too high or low for a Tubular arrangement

**Gambar 2.41 Tampilan Pengaturan Turbin TURBNPRO V3**

Hasil simulasi TURBNPRO meliputi:

1. Ringkasan tentang karakteristik turbin

Setelah simulasi maka TURBNPRO akan memberikan ringkasan tentang spesifikasi teknis turbin meliputi: dimensi turbin, kecepatan dan analisa kavitas pada turbin.

**TURBNPRO 3: Francis Solution Summary (Page 1)**

Solution File Name: No File Name      Turbine Performance Data - Typical

Close    Next Page    Print Report    Display Input    Definitions

Performance at rated net head of: 87.0 meters

m <sup>3</sup> /s	% Eff	KW	% Rated	
67.94	93.5	54245	100.8	**
67.40	93.6	53845	100.0	
67.40	93.6	53845	100.0	*
50.55	89.6	38670	75.0	
33.70	75.7	21781	50.0	
16.85	48.5	6977	25.0	
44.40	85.9	32547	65.9	+

\*\* Overcapacity    \* Peak Eff. Condition    + Draft Tube Surging peaks

Efficiency Modifiers: Multiplier: 1.0000    Flow<sup>2</sup> Function: 0.0000

**Maximum Output Performance**

At maximum net head of 87.0 m    At minimum net head of 85.0 m

54235 KW	53085 KW
93.5 % Eff	93.4 % Eff
67.94 m <sup>3</sup> /s	68.19 m <sup>3</sup> /s
0.125 σ allow	0.128 σ allow

Runner Diameter: 2933 mm  
Speed: 230.8 rpm

σ allowable at 100% KW and Rated Net Head: 0.124  
σ plant at 100% KW and Rated Net Head: 0.125

Maximum Runaway Speed: 414 rpm (at the Maximum Net Head above)  
Flow at Runaway Speed: 45.0 m<sup>3</sup>/s (at Rated Net Head and 100% Gate)  
Flow at Speed-No-Load: 9.52 m<sup>3</sup>/s (at Rated Net Head)  
Site Atmospheric Pressure minus Vapor Pressure (Hatm - Hvp): 9.89 meters

Unit Centerline to T.W.: -1.0 meters

Specific Speed under Rated Net Head:  
201.5 at Peak Efficiency  
201.5 at 100% Output

---

**TURBNPRO 3: Francis Solution Summary (Page 2)**

Solution File Name: No File Name      Turbine Dimensional Data - Typical

Previous Page    Next Page    Close    Display Input    Definitions

Runner Diameter: 2933 mm      Orientation: VERTICAL

**Intake Type - SPIRAL CASE**

Inlet Diameter: 3.35 meters  
Inlet Offset: 4.01 meters  
Centerline to Inlet: 4.85 meters  
Outside Radius A: 5.69 meters  
Outside Radius B: 5.40 meters  
Outside Radius C: 4.93 meters  
Outside Radius D: 4.43 meters

**Draft Tube Type - ELBOW**

Centerline to Invert: 8.84 meters  
Length: 14.08 meters  
Exit Width: 8.80 meters  
Exit Height: 5.28 meters

Velocity at Draft Tube Exit: 1.45 m/sec (at Rated head and Discharge)

**Shaft Arrangement - WITH SHAFT AND BEARINGS**

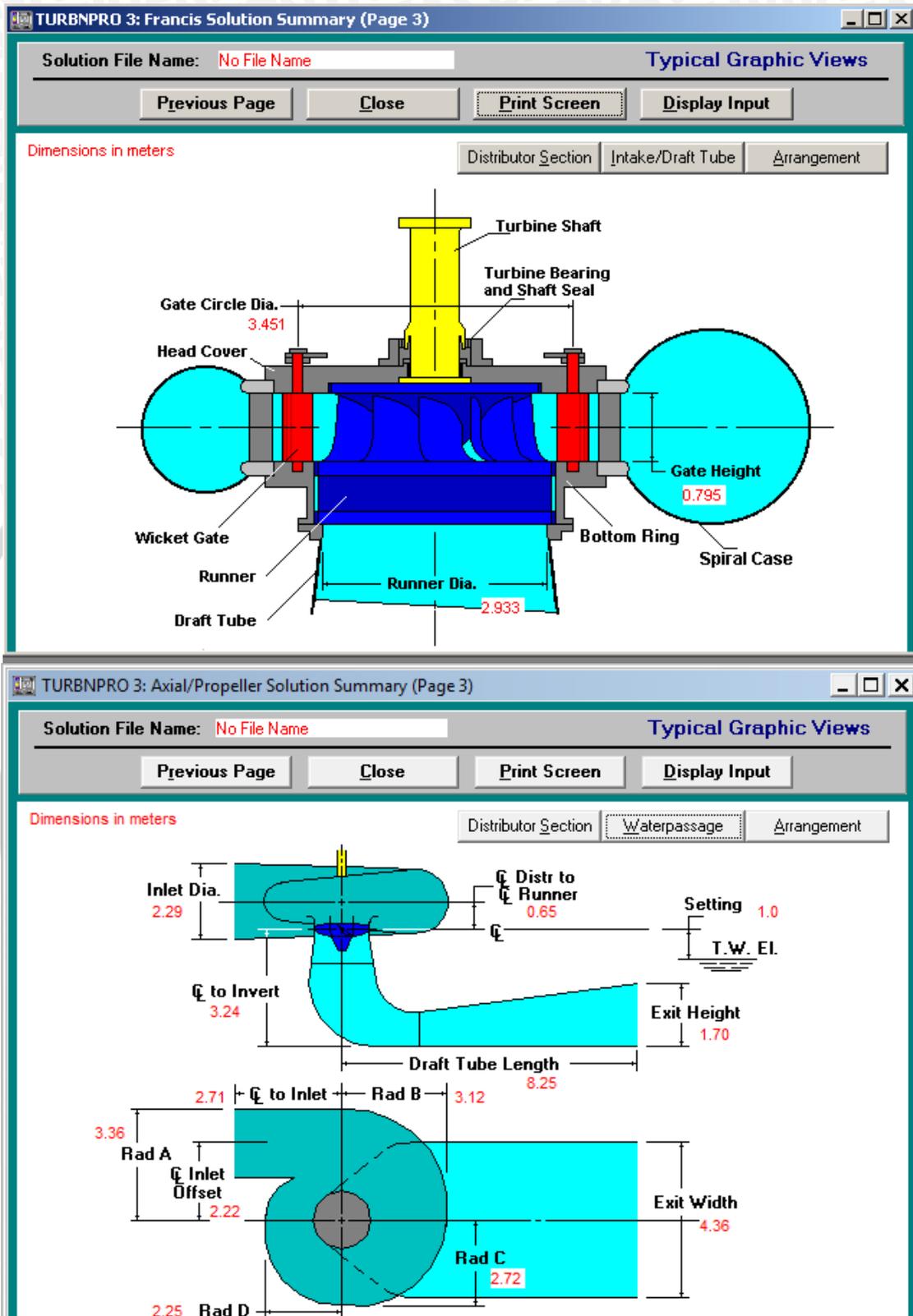
Centerline to Shaft Coupling: 3451 mm  
Turbine Shaft Diameter: 753 mm

**Miscellaneous -**

Wicket Gate Height: 795 mm  
Gate Circle Diameter: 3451 mm  
Runner and Shaft Weight: 29868 kg  
Estimated Runner Weight: 16554 kg  
Maximum Hydraulic Thrust: 120337 kg (under the Maximum Net Head)

Gambar 2.42 Tampilan Ringkasan Desain TURBNPRO V3

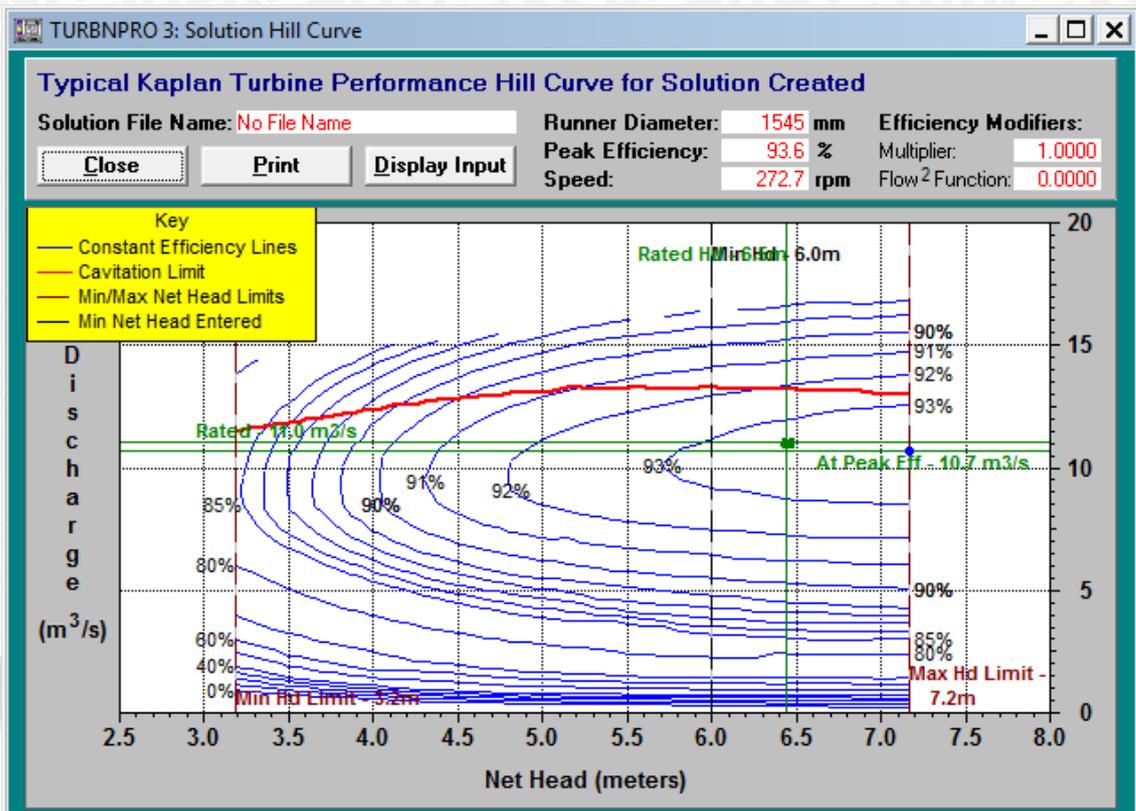
2. Gambar desain



Gambar 2.43 Tampilan Gambar Desain TURBNPRO V3



3. Hill curve atau kurva performa turbin



Gambar 2.44 Tampilan Hill Curve TURBNPRO V3

