

# TURBIN AIR PENGGERAK GENERATOR LISTRIK PADA PLTA SIPAN SIHAPORAS SIBOLGA

DAYA : 17 MW  
HEAD : 76 M  
PUTARAN : 375 rpm

## TUGAS AKHIR

*Diajukan sebagai salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Studi Pada Fakultas Teknik  
Universitas Medan Area*



Oleh :

**HERU ROESTAMAJI**

**NIM : 02.813.0060**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA  
MEDAN**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 29/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

# TURBIN AIR PENGERAK GENERATOR LISTRIK PADA PLTA SIPAN SIHAPORAS SIBOLGA

## TUGAS AKHIR

OLEH :

NAMA : HERU ROESTAMADJI  
STB : 02.813.0060



Disetujui :

Pembimbing I

( Ir. Amirsyam Nasution, MSc )

Pembimbing II

( Ir. Darianto, MSc )

Mengetahui :

Dekan

( Drs. Dadan Ramdan, M.Eng. Sc )

Ka. Program Studi



( Ir. Darianto, Msc )

Tanggal Lulus :

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 29/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area



## RINGKASAN

Listrik saat sekarang sudah menjadi kebutuhan primer bagi masyarakat dan perusahaan serta pabrik-pabrik dimana kebutuhan akan pasokan listrik juga semakin meningkat, maka dari pihak PT. PLN (Persero) juga meningkatkan kualitas dan kuantitas pembangkit listriknya baik itu tenaga diesel, gas, uap, dan air.

Seperti halnya dengan PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) Sipan Sihaporas yang berada di kota Sibolga tepatnya didesa Sihaporas Kabupaten Tapanuli Utara Propinsi Sumatera Utara yang baru saja dibangun dan diresmikan oleh Menteri Sumber Daya dan Energi baru-baru ini (Power Station No. 1 dengan daya 17 MW head 67,3 m), karena letak keadaan alam Sibolga yang terdiri dari pegunungan sehingga sangat memungkinkan untuk dibangun PLTA, direncanakan pembangunan terdiri dari 2 (dua) buah rumah turbin (Power Station), ini meliputi pembangunan Dam penampungan air yang juga akan dijadikan obyek wisata, pembangunan Head Race sepanjang 115 m, kemudian pembangunan Turbin Air Type Francis dengan daya output 33 MW (PS No. 2) dan 17 MW (PS No. 1) dengan jumlah total output 50 MW, dan disertai pembangunan Tail Race yang dilengkapi dengan pengaturan secara komputerisasi sehingga penggunaan lebih efisien dan efektif, spesifikasi pembangunan terlampir.

Karena PLTA ini masih dalam pembangunan sehingga sangat memungkinkan bagi penulis untuk meriset langsung dan mengetahui bagian-bagian dalam turbin.

Tujuan dari pembangunan PLTA ini adalah untuk meningkatkan pasokan listrik di daerah Sumatera Utara dan membantu PLTD, PLTG, PLTU dan PLTMH yang ada agar tidak terjadi kekurangan pasokan listrik untuk daerah Sumatera Utara dan Nias.

Turbin Francis ini dibuat oleh Thosiba co, Jepang, yang bekerja sama dengan kontraktor local (TEPSCO) dan bergaransi selama 2 tahun yang hamper menelan biaya Rp. 175 Miliar.

## DAFTAR ISI

	Hal
KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SIMBOL.....	viii
DAFTAR NOTASI YUNANI.....	ix
<b>BAB I. PENADAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Tujuan Perencanaan.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	4
1.4. Tujuan Penulisan.....	4
1.5. Manfaat.....	4
1.6. Metode Pengumpulan Data.....	5
1.7. Tinjauan Umum PLTA Sipan Sihaporas.....	5
<b>BAB II. LANDASAN TEORI.....</b>	<b>6</b>
2.1. Mesin-Mesin Fluida.....	6
2.2. Turbin Air dan Klasifikasinya.....	7
2.3. Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Air.....	17
2.4. Tinggi Tekan dan Daya Turbin.....	19
2.5. Momen pada Turbin.....	21
<b>BAB III PERENCANAAN INSTALASI.....</b>	<b>22</b>
3.1. Pengukuran Kapasitas Air Sungai.....	22
3.2. Perencanaan Pipa Pengantar Atas.....	27
3.3. Perencanaan Pipa Pesat (Penstock).....	29
3.4. Perhitungan Kehilangan Tinggi Tekan (Head Loss) Pada Pipa Pengantar Aliran.....	32
3.5. Analisis Water Hammer (Palu Air).....	42



<b>BAB IV. PEMILIHAN JENIS TURBIN .....</b>	<b>48</b>
4.1. Putaran Turbin dan Putaran Generator .....	48
4.2. Daya Turbin .....	50
4.3. Putaran Spesifik Turbin .....	52
4.4. Analisa Jenis Turbin yang digunakan .....	52
4.5. Analisa Pemilihan Posisi Poros Turbin.....	52
4.6. Pemilihan Rumah Turbin.....	54
4.7. Daya dan Putaran Generator .....	54
4.8. Putaran Liar (Run Away Speed) .....	56
<b>BAB V. PERENCANAAN BAGIAN-BAGIAN UTAMA TURBIN .....</b>	<b>57</b>
5.1. Sudu Gerak (runner).....	57
5.2. Sudu Pengarah (Guide Venn).....	69
5.3. Rumah Turbin (Scroll Casing).....	71
5.4. Kavitasi dan Pipa Lepas .....	77
5.5. Poros Turbin .....	82
5.6. Kopling.....	85
5.7. Baut pengikat Sudu Gerak (runner) dan Pengikat Kopling.....	86
<b>BAB VI. SISTEM PENGATURAN TURBIN DAN PELUMASAN .....</b>	<b>88</b>
6.1. Sistem Pengaturan Turbin.....	88
6.2. Pelumasan .....	92
<b>BAB VII. KESIMPULAN.....</b>	<b>96</b>
<b>DAFTAR LITERATUR .....</b>	<b>99</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>100</b>
<b>GAMBAR KERJA</b>	

## BAB I

# PENDAHULUAN

### I.1. Latar Belakang Masalah

Letak geografis negara Indonesia yang sangat strategis, yakni terletak pada garis khatulistiwa, berbentuk pada kondisi alam dan lingkungan yang cukup baik.

Banyaknya kekayaan akan sumber daya alam yang sangat beraneka ragam yang terkandung di bumi Indonesia belum sepenuhnya dapat digali dan dimanfaatkan secara optimal.

Posisi Indonesia yang dilalui garis khatulistiwa menjadikannya mendapat penyinaran matahari yang cukup dan pola hujan yang relatif teratur. Komposisi curah hujan yang cukup teratur itu membuat terciptanya sungai-sungai, baik itu yang besar maupun yang kecil. Kondisi ini belum sepenuhnya dimanfaatkan guna kesejahteraan masyarakat.

Mengingat semakin terbatasnya persediaan sumber energi yang tersedia diperut bumi seperti minyak bumi, gas dan barang tambang lainnya dan kebutuhan akan sumber energi tersebut akan semakin meningkat yang disebabkan oleh kemajuan industri dan pemenuhan kebutuhan masyarakat. Untuk itu dirasakan sangat perlu mencari alternatif sumber energi cadangan yang mungkin bisa diharapkan akan mengurangi pemakaian minyak bumi dan gas tersebut.

Dengan demikian ilmu pengetahuan telah banyak ditemukan alternatif sumber energi lain, seperti :

- Energi air
- Geothermal (panas bumi)

**UNIVERSITAS MEDAN AREA**

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

Document Accepted 29/12/23

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber

2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah

3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area (repository.uma.ac.id)29/12/23

- Tenaga nuklir
- Tenaga angin (kincir angin)
- Gelombang laut dan sebagainya

Diantara berbagai sumber energi alternatif di atas dirasakan bahwa sumber energi air inilah yang menjadi salah satu prioritas utama yang cukup baik untuk dikembangkan. Mengingat banyaknya sungai yang terdapat di negara kita ini yang cukup potensial untuk dimanfaatkan menjadi sumber energi masa depan yang berkesinambungan.

Penggunaan tenaga air menjadi sumber energi haruslah berdasarkan beberapa hal antara lain :

- Kualitas dan kuantitas air yang tersedia. Hal ini penting guna menjamin kontinuitas aliran
- Tinggi jatuh air (head) yang cukup sehingga memungkinkan untuk dimanfaatkan

Bila aliran yang mempunyai debit dan ketinggian jatuh dialirkan ke turbin air, maka energi potensial air yang dimiliki (akibat tinggi jatuh air) dan energi kinetik (akibat kecepatan aliran) akan berubah menjadi energi mekanis (energi gerak) pada turbin air dan poros generator maka energi mekanis akan berubah menjadi energi listrik.

Berdasarkan kapasitas air dan tinggi air jatuh air yang digunakan untuk mengubah energi menjadi energi listrik dapat digolongkan menjadi :

- Debit air serta ketinggian jatuh air relatif besar disebut Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)
- Debit air serta ketinggian jatuh air relatif kecil disebut Pembangkit Listrik Tenaga Minihydro (PLTM)



## 1.2. Tujuan Perencanaan

Kebutuhan manusia akan listrik akan semakin meningkat. Hal ini sangat erat kaitannya dengan peningkatan kualitas pemukiman lingkungan serta perekonomian masyarakat yang semakin maju.

Bila ditinjau dari segi ekonomisnya PLTA maupun PLTM, relatif menguntungkan dibandingkan dengan pembangkit listrik yang lain, seperti pembangkit tenaga diesel (PLTD, pembangkit tenaga gas (PLTG) dan lain-lain.

Ada beberapa keuntungan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) ini antara lain :

- Tidak membutuhkan bahan bakar, maka tidak ada biaya untuk angkutan penyimpanan bahan bakar maupun pembuangan sisa bahan bakar.
- Konstruksi lebih sederhana.
- Biaya operasional rendah.
- Perawatan tidak begitu rumit.
- Tidak menimbulkan polusi atau bebas polusi.
- Air dan proses dapat digunakan kembali untuk berbagai keperluan masyarakat sekitar.

Disamping keuntungan tersebut tentu ada juga kelemahan yakni antara lain :

- Biaya investasi awal yang cukup besar.
- Sangat dipengaruhi oleh iklim (curah hujan).
- Masa persiapan pembangunan pada umumnya memakan waktu yang cukup lama.
- Karena PLTA ditempatkan dimana air Q dan H tertentu tersedia, sering berada dilokasi yang jauh dari pemukiman (kota-kota/industri), maka kerugian jala-jala/transmisi cukup besar.



### **1.3. Batasan Masalah**

Dalam perencanaan tugas ini penulis memandang perlu untuk membatasi permasalahan yang akan dibahas. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari penyimpangan dari batasan masalah.

Sehubungan dengan hal diatas, maka penulis yang menguraikan beberapa topik pembahasan, antara lain :

- Sistem pemipin dan kerugian tekanan pada instalasi.
- Pemilihan turbin yang sesuai.
- Perencanaan bagian-bagian utama turbin.
- Sistem pengaturan daya turbin.

Pada perencanaan ini hanya meliputi spesifikasi dan bentuk Konstruksinya saja tidak termasuk estimasi biaya.

### **1.4. Tujuan Penulisan**

Adapun tujuan penulisan tugas akhir ini adalah sebagai salah satu syarat bagi penulis untuk menyelesaikan studi di Universitas Islam Sumatrera Utara.

### **1.5. Manfaat**

Tugas sarjana ini diharapkan bermanfaat bagi :

- Rekan mahasiswa yang mungkin akan membahas permasalahan yang sama.
- Semua pihak yang mengetahui tentang turbin air.
- Bagi penulis guna menambah pengetahuan dan pengalaman agar mampu mengaplikasikannya di lapangan pekerjaan.

## 1.6. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang dilakukan dalam menyusun skripsi ini adalah :

- Survey lapangan dan pengambilan data-data yang diperlukan.
- Study literatur tentang aspek yang berkaitan dengan prinsip dan proses kerja turbin.

## 1.7. Tinjauan Umum PLTA Sipan Sihaporas

PLTA Sipan Siaphoras ini terletak didesa Sibuluan III Kabupaten Tapanuli Tengah ± 9 Km dari kota Sibolga. Pemilihan lokasi ini sebagai tempat survey karena proyek PLTA ini masih dalam penyelesaian (hanya Power Station No.1 yang telah beroperasi) sehingga penulis bisa melihat langsung di lapangan bentuk konstruksi dari turbin air tersebut dan pemasangan alat-alat penunjang pembangkit listrik tenaga air.

Jumlah turbin yang digunakan pada PLTA ini sebanyak 2 (dua) buah unit Type turbin yang digunakan adalah turbin Francis poros vertikal dengan kapasitas daya keseluruhan 50 MW, yaitu Power Station No.1 dan Power Station No.2.

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### II.1. Mesin-mesin Fluida

Mesin-mesin fluida adalah mesin-mesin yang dapat merubah energi fluida (energi potensial dan energi kinetik) menjadi energi mekanis atau sebaliknya merubah energi mekanis menjadi energi fluida.

Berdasarkan defenisi diatas, maka secara umum mesin-mesin fluida dapat diklasifikasikan menjadi 2 bagian antara lain :

##### a. Mesin-mesin Tenaga

Mesin-mesin tenaga merupakan mesin-mesin fluida yang merubah energi fluida menjadi mekanis, mesin-mesin fluida yang termasuk kedalam-mesin-mesin tenaga adalah :

- Turbin Air
- Turbin Uap
- Turbin Gas
- Kincir Angin
- Kincir air dan lain-lain.

##### b. Mesin-mesin Kerja

Mesin-mesin kerja merupakan mesin-mesin fluida yang dapat merubah energi fluida. Mesin-mesin fluida yang termasuk kedalam mesin-mesin adalah :

- Pompa
- Kompresor
- Blower

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang



- Fan dan lain-lain.

Berdasarkan pembagian defenisi mesin-mesin fluida diatas digolongkan bahwa proses kerja dari pompa adalah merupakan kebaikan dari proses kerja turbin air.

Sesuai dengan spesifikasi tugas, maka pada perencanaan ini akan dibahas salah satu dari mesin-mesin tenaga yaitu Turbin Air.

## II.2. Turbin Air dan Klasifikasinya

Turbin air merupakan salah satu dari mesin tenaga, dimana air sebagai fluida kerjanya dan air tersebut dialirkan dari tempat yang lebih tinggi ketempat yang lebih rendah melalui pipa. Kaidah energi menyatakan bahwa suatu bentuk akan dapat diubah menjadi bentuk energi lain.

Arus air yang mengalir mengandung energi dan energi tersebut dapat diubah bentuknya, misalnya perubahan dari bentuk energi potensial (tekanan) kedalam energi kinetis (kecepatan) atau sebaliknya.

Arti selanjutnya dari kaidah kekekalan energi adalah *apabila arus air dalam alirannya dilewatkan melalui turbin air, maka energi yang ada dalam air akan diubah menjadi bentuk energi lain.*

Dengan adanya perbedaan tinggi air jatuh maka air memiliki energi potensial. Pada saat air mengalir pada pipa dengan kecepatan tertentu, energi potensial air berangsur-angsur berubah menjadi energi kinetik air. Pada saat di Nozzle seluruh energi potensial diubah menjadi energi kinetik.

Air yang keluar dari ujung Nozzle, akan menghantam sudut gerak (runner) yang di kopel langsung poros utama turbin, maka pada saat itu terjadi perubahan energi kinetik air

menjadi energi mekanik putar pada poros yang dipakai untuk memutar rotor generator untuk mendapatkan energi listrik.

Jenis dan tipe konstruksi turbin air yang umum digunakan untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) terlihat pada gambar 2.1. berikut :



Gambar 2.1. Type Konstruksi Turbin Air

Keterangan Gambar :

- a. Turbin Francis dengan rumah saluran terbuka (open flume) poros vertikal
- b. Turbin Francis dengan rumah saluran terbuka (open flume) poros horizontal
- c. Turbin Kaplan dengan bangunan rumah dari beton
- d. Turbin Kaplan dengan bangunan rumah dari baja
- e. Turbin Francis dengan rumah saluran tertutup (closed flume) poros horizontal
- f. Turbin Francis dengan rumah saluran tertutup (closed flume) poros vertikal
- g. Turbin Pelton dengan perencanaan empat buah Nozzle
- h. Turbin pelton dengan perencanaan dua buah Nozzle.

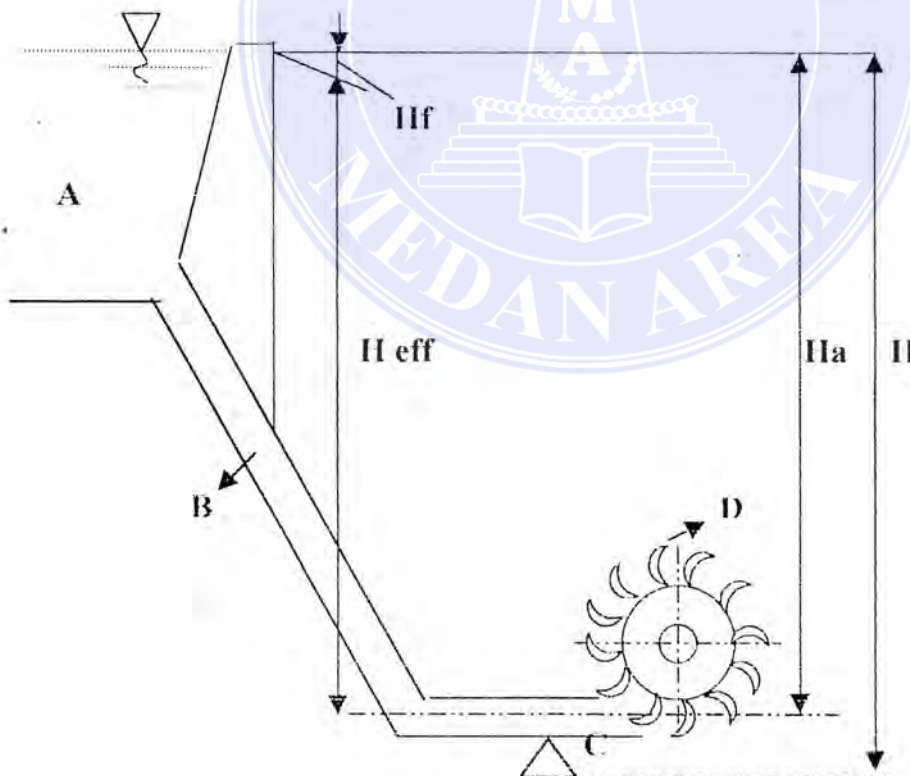
Secara umum turbin air dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal antara lain

- Berdasarkan perubahan momentum
- Ketinggian jatuh air (head)
- Posisi poros turbin
- Arah aliran air sudut gerak
- Berdasarkan putaran spesifik.

### II.2.1. Klasifikasi Turbin dari Segi Perubahan Momentum

Dari segi perubahan momentum fluida, turbin air dibagi atas dua bagian :

- Turbin Impuls ( Impuls Turbine)
- Turbin Reaksi (Reaction Turbine)
- Turbin Aksi (Impuls).**



Gambar 2.2. Instalasi Turbin Aksi



Keterangan Gambar :

- Ha : Head Aktual
- Hf : Kerugian tinggi tekan (Head Losses)
- Heff : Head Efektif
- H : Head Gross (Ketinggian rencana)
- A : Reservoir
- B : Penstock
- C : Nozzle
- D : Buckets
- E : Tail Race

Gambar 2.2 menunjukkan air yang berasal dari *Penstock* langsung memnuju *Nozzle*. Pada *nozzle* seluruh tekanan energi dirubah menjadi energi kinetik, air disemprotkan langsung dari mulut *nozzle* menuju bucket yang dipasang pada permukaan roda turbin, dan terjadi tumbukan antara air dengan bucket, sehingga terjadi porubahan dari aliran fluida yang menyebabkan bucket menerima gaya dorongan yang bekerja sebagai gaya tangensial terhadap poros turbin pada proses ini tidak terjadi perbedaan tekanan air masuk dengan air keluar dari roda turbin tetapi kecepatan air keluar dari mulut roda lebih besar dari pada kecepatan air keluar dari roda turbin.

Jenis ini anantara lain :

- Turbin jonval
- Turbin Pelton
- Turbin Girard
- Turbin Tunga
- Turbin Bangki

Pada masa sekarang ini jenis turbin aksi (Impuls) yang masih banyak dipakai adalah Turbin Pelton, dimana turbin ini beroperasi pada head yang tinggi dan kapasitas ruang kecil.

UNIVERSITAS MEDAN AREA

## b. Turbin Reaksi

Pada turbin ini aliran air pada saluran masuk (Penstock dan Casing) yang mempunyai energi potensial dan kinetik langsung dialirkan pada sudut-sudut gerak yang terpasang pada turbin (runner). Momentum yang terjadi pada roda turbin. Menghasilkan energi kinetik dan energi tekan turbin reaksi karena ada perbedaan tekanan antara tekanan air masuk ke turbin dan tekanan air keluar turbin. Tekanan air masuk turbin lebih besar dari tekanan air keluar turbin. Perbedaan tekanan ini menyebabkan terjadinya kecepatan putaran dari sudu-sudu yang disebut tekanan reaksi. Kecepatan air masuk turbin lebih besar dari pada kecepatan air keluar turbin.

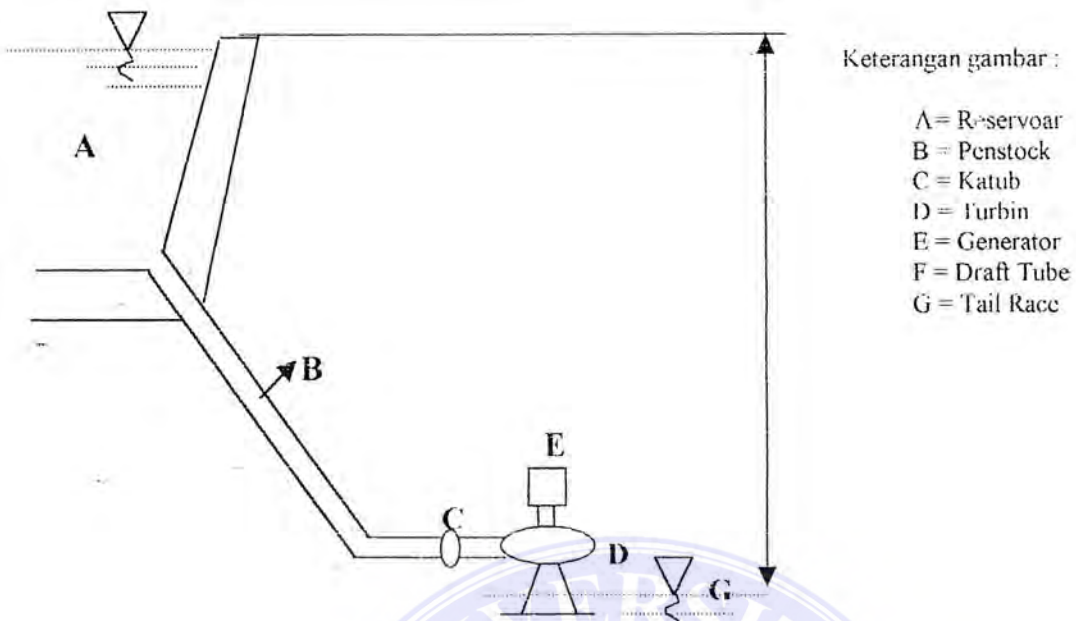
Rumah keong (casing) sebagai penyalur air berada jalan juga harus mampu mendukung tekanan air yang cukup besar. Hal ini menunjukkan bahwa casing mempunyai fungsi yang sangat penting.

Jenis-jenis Turbin Reaksi :

- Turbin Francis
- Turbin Propeller
- Turbin Kaplan

## II.2.2. Klasifikasi Turbin dari Segi Ketinggian Jatuh Air

Dalam pemilihan turbin dapat dibedakan berdasarkan ketinggian jatuh air, dimana untuk setiap ketinggian jatuh air yang berbeda kita menggunakan jenis turbin yang berbeda pula.



Gambar 2.3. Intraksi Turbin Reaksi

Penentuan jenis turbin yang digunakan berdasarkan ketinggian air jatuh, dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut :

Tabel 2.1 . Klasifikasi Berdasarkan Ketinggian Jatuh Air

Ketinggian Air Jatuh	Jenis Turbin
$H > 300 \text{ m}$	Turbin Pelton
$240 \text{ m} \div 300 \text{ m}$	Turbin Pelton atau Turbin Francis
$150 \text{ m} \div 240 \text{ m}$	Turbin Francis atau Turbin Pelton
$60 \text{ m} \div 150 \text{ m}$	Turbin Francis
$30 \text{ m} \div 60 \text{ m}$	Turbin Francis atau Turbin Kaplan
$15 \text{ m} \div 30 \text{ m}$	Turbin Kaplan atau Turbin Francis
$H < 15 \text{ m}$	Turbin Kaplan

(Sumber :S. Ramamrutham Hydraulic Fluid Mechnic and Fluis Machine 2<sup>nd</sup> . DhanpatRai dan Sons Naisarak Delhi, 1982 hal. 830 )

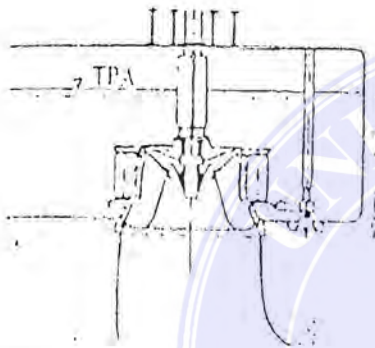


### II.2.3. Klasifikasi Turbin Berdasarkan Posisi Poros Turbin

Poros turbin sangat penting dalam perencanaan turbin air, karena poros dengan putarannya berfungsi meneruskan daya dan putaran ke generator.

Posisi poros turbin dapat dibagi atas dua bagian :

- a. Turbin air dengan poros vertikal
- b. Turbin dengan poros horizontal



Gambar 2.4. Turbin Poros Vertikal



Gambar 2.5. Turbin Poros Horizontal

Jenis poros vertikal lebih baik untuk turbin berkapasitas besar dan untuk poros horizontal biasanya digunakan untuk turbin yang berkapasitas kecil dan daya kecil.

### II.2.4. Klasifikasi Turbin Berdasarkan Arah Aliran Air pada Sudu Turbin

Arah aliran pada sudu gerak (runner) dan turbin dapat menentukan klasifikasi turbin. Pembagian turbin air menurut arah aliran terbagi atas :

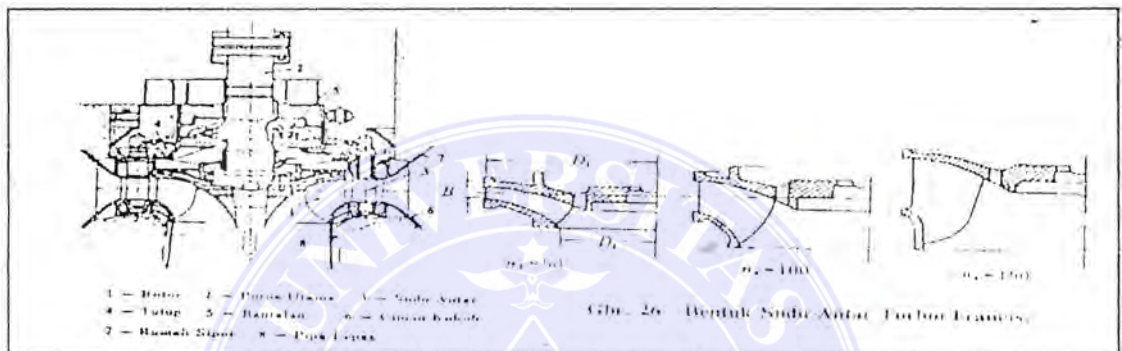
- Turbin aliran radial (Radial Flow Turbine)
- Turbin aliran Tangensial ( Axial Flow Turbine)
- Turbin aliran diagonal ( Diagonal Flow Turbine)

**a. Turbin aliran radial (Radial Flow Turbine)**

Pada turbin jenis ini, arah aliran air adalah arah melingkar (radial) yaitu berupa aliran sisi masuk dan sisi keluar. Aliran radial dibagi atas dua bagian :

- Turbin aliran dalam (Inward flow turbin)
- Turbin aliran luar (Outward flow turbin)

Contoh turbin aliran radial seperti Turbin Francis :

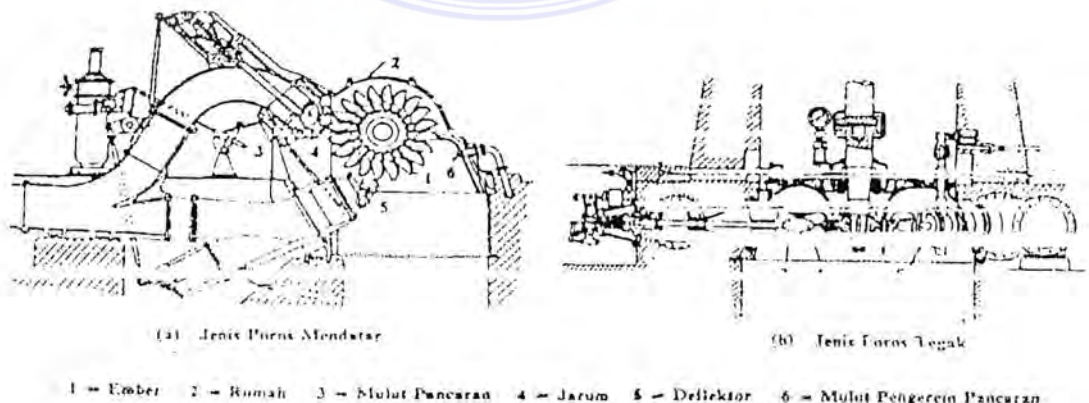


Gambar 2.6. Turbin Aliran Radial.

**b. Turbin aliran tangensial (Tangensial flow turbine)**

Pada turbin jenis ini, aliran air memukul runner dengan arah tangensial sehingga runner berputar. Pada gambar 2.7 menunjukkan air yang keluar dari mulut nozzle memukul buckets sehingga runner berputar pada porosnya.

Jenis turbin ini yang mempunyai aliran tangensial adalah seperti Turbin Pelton.

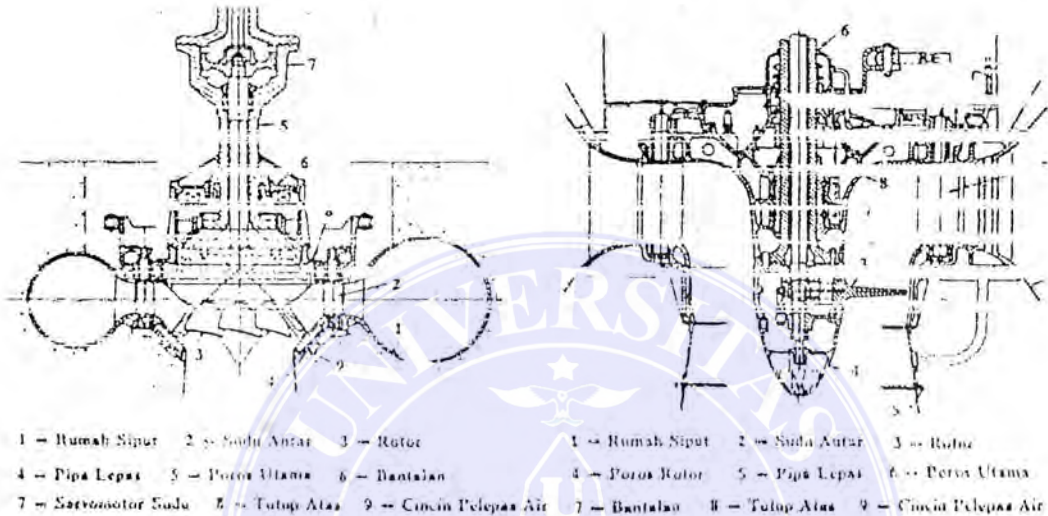


Gambar 2.7. Turbin Aliran Tangensial

**c. Turbin aliran axial (Axial flow turbine)**

Pada turbin ini arah aliran masuk dan keluar runner dengan arah paralel menuju ketangkai poros turbin. Sebagai salah satu type turbin modern

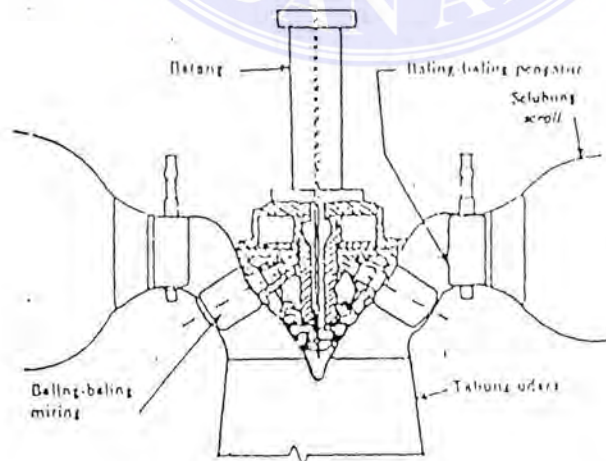
Contoh dari turbin Kaplan



Gambar 2.8. Turbin Aliran Axial

**d. Turbin aliran diagonal (Diagonal flow turbine)**

Pada turbin ini aliran tidak ada yang sejajar, maupun tegak lurus poros, tetapi pada umumnya dalam arah bersiku berkeenaan denga poros. Contoh turbin ini adalah Turbin Deriaz.



Gambar 2.9. Turbin Aliran Diagonal.



### 11.2.5. Klasifikasi Turbin berdasarkan Putaran Spesifik

Putaran spesifik dari turbin air dapat didefinisikan sebagai kecepatan putaran dari jenis turbin tertentu yang beroperasi pada satu-satuan ketinggian jatuh air (head) untuk menghasilkan satu-satuan daya. Putaran spesifik dinyatakan dengan persamaan :

$$n_s = \frac{n \sqrt{P}}{H^{5/4}} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

- $n_s$  = Putaran spesifik (rpm)
- $n$  = Putaran turbin (rpm)
- $P$  = Daya yang dihasilkan turbin (Hp)
- $Q$  = Kapasitas aliran air ( $m^3/s$ )
- $H$  = Tinggi tekanan efektif (m)

Dengan mengetahui putaran spesifik dari suatu turbin, maka dapat ditentukan jenis turbin. Tabel 2.2. dapat menentukan jenis turbin yang digunakan

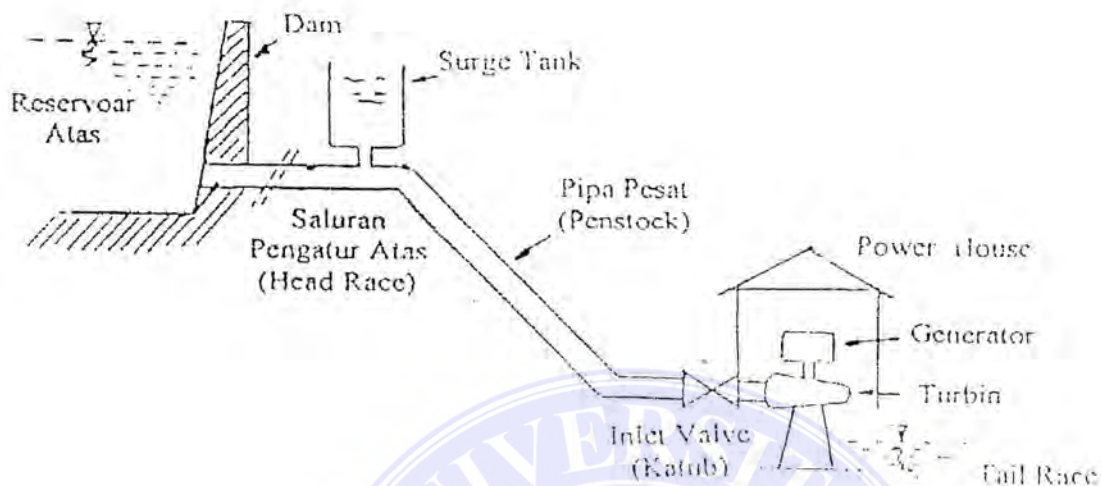
Tabel 2.2. Klasifikasi Turbin Air berdasarkan Putaran Spesifik.

Jenis Turbin	Putaran Spesifik		
	Lambat	Sedang	Cepat
Turbin Pelton	4 ÷ 5	16 ÷ 30	31 ÷ 70
Turbin Francis	60 ÷ 150	151 ÷ 250	251 ÷ 400
Turbin Kaplan	300 ÷ 450	451 ÷ 700	701 ÷ 1100

( Sumber MM Dandekar, KN Sharma Pembangkit Listrik Tenaga Air)

(1) Marine Auxiliary Machinery and System from the Russian by Nicholas Weisten. Hal. 256

## II.3. Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Air



Gambar 2.10. Komponen Utama PLTA

### 1. Bendungan (Dam)

Bendungan merupakan suatu wadah penampang air yang berasal dari sungai, danau, dan lain, serta penyalur air ke turbin guna untuk membangkitkan tenaga listrik dengan memanfaatkan perbedaan permukaan air atas Head race dan permukaan air bawah Tail race.

Sesuai dengan tujuan penggunaan bendungan dapat digolongkan yaitu :

- Bendungan pemasukan (Intake Dam)
- Bendungan penyimpanan (Storage)
- Bendungan penatur (Regulating Dam)
- Bendungan penyimpanan di pompa (Pump Storage Dam)

Adapun fasilitas pendukung bendungan antara lain saluran limbah (spill way), reservoir, pintu masuk (Intake gate), kolam pengendap pasir, saringan dan lain-lain.

Saluran limbah biasanya dibangun pada bendungan untuk mengalirkan kelebihan air seperti pada waktu banjir dan pada saat turbin tidak dioperasikan.

## 2. Saluran Pengantar Atas (Head Race/Low Pressure Pipe)

Air dari reservoir mengalir melalui saluran air pipa tekan (Penstock). Saluran air ini dapat berupa canal dan berupa terowongan tekan (pipa Penstock). Perencanaan ukuran saluran perlu diperhatikan dengan tujuan untuk mendapatkan dimensi pipa yang sesuai untuk mengalirkan kapasitas aliran air dari saluran pengantar sampai ke surge tank.

## 3. Tangki Peredam Tekanan (Surge Tank)

Surge tank berfungsi untuk mengurangi besarnya water hammer yang terjadi pada pipa pesat dan low pressure pipa pada saat dilakukan penutupan mendadak (full load rejection) maupun penutupan akibat pengaturan putaran, dengan ini efek palu air atau water hammer yang terjadi pada pipa dapat dikurangi.

Ada beberapa jenis tangki peredaman tekanan yang dikenal, yaitu :

- Tangki peredam sederhana (Simple Surge Tank)
- Tangki peredam orifis (Orifice Surge Tank)
- Tangki peredam diferensial (Diferensial Surge Tank)

## 4. Pipa Pesat (Penstock)

Perencanaan pipa (penstock) dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan dimensi yang sesuai untuk mengalirkan kapasitas air dari surge tank ke rumah turbin.

## 5. Rumah Pembangkit (Power House)

Rumah pembangkit (Power house) adalah tempat penempatan fasilitas turbin air, peralatan-peralatan pembantu, generator dan lain-lain. Power house ini juga berfungsi sebagai pelindung dari panas dan hujan.



Bangunan ini merupakan stasiun kontrol dari energi yang dibangkitkan oleh turbin dan generator.

## 6. Pipa Lepas (Draft Tube)

Draft tube adalah bagian dari water way yang mengalirkan air setelah keluar dari turbin ke arah tail race. Perencanaan draft tube amat tergantung pada spesifikasi turbin.

## 7. Saluran Buang (Tail Race)

Tail race adalah bagian hilir (permukaan terendah) dari keseluruhan water way, yang dimulai dari akhir draft tube sampai dengan sungai (reservoir bawah).

Fungsi dari tail race adalah saluran pengantar atau pembuangan air yang telah terpakai untuk pembangkit listrik.

## II.4. Tinggi Tekan dan Daya Turbin

### II.4.1. Tinggi Tekan Turbin

Tinggi tekan adalah merupakan perbedaan ketinggian antara permukaan air atas dengan permukaan air bawah pada tail race, perbedaan ketinggian ini disebut juga head actual, dengan mengabaikan rugi-rugi sepanjang jalan pipa pengantar, dengan kata lain disebut head kotor atau gross head.

Kerugian-kerugian ketinggian tekanan (head loss) yang terjadi sepanjang saluran/pipa disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu :

#### a. Kehilangan tinggi tekan pada head race/low pressure pipe.

- Akibat gesekan
- Akibat belokan (Elbow)
- Akibat pemasangan katub

### b. Kehilangan tinggi tekan pada pipa pesat (Penstock)

- Akibat gesekan
- Akibat belokan (Elbow)
- Akibat pemasangan katub.

Tinggi tekanan yang berfungsi untuk membangkitkan daya turbin adalah head efektif. Head efektif merupakan selisih antara head aktual dengan total kehilangan head (head loss).

## II.4.2. Daya Turbin

Daya turbin adalah daya yang diakibatkan perubahan energi kinetik air menjadi energi mekanik pada sudu gerak (runner) dan didistribusikan ke poros turbin. Daya yang dihasilkan turbin air tidak semua dapat diterima generator, hal ini disebabkan sebagian hilang pada hidroulik resistance, kebocoran-kebocoran sekitar runner turbin, gesekan disc dan gesekan antara poros dengan bantalan dan kerugian teknik lainnya.

Dengan adanya kehilangan daya turbin ini, maka efisiensi turbin harus diperhitungkan, sehingga daya yang dapat dihasilkan turbin menurut persamaan <sup>(2)</sup> adalah :

$$P = \frac{W \cdot Q \cdot h}{75} \cdot \eta_o \quad (2)$$

Dimana :

- P = Daya yang dihasilkan turbin (HP)
- $\eta_o$  = Effisiensi turbin (%)
- W = Satuan berat air (berat jenis air) = 1000 Kg/m<sup>3</sup> (keadaan normal)
- Q = Debit air (m<sup>3</sup>/s)
- H = Head efektif (m)

<sup>(2)</sup> Pembangkit Listrik Tenaga Air, MM Dandekar, KN Sharma ; hal. 396

## II.5. Momen pada Turbin

Turbin menghasilkan kerja dari fluida yang mengalir terus-menerus melalui sudu-sudu gerak dan sudu-sudu tetap. Bila fluida mendekati jajaran sudu tetap dalam arah radial, maka momentumnya berubah dari nol menjadi suatu nilai yang bergantung pada massa aliran yang mengalir persatuan waktu, komponen tangensial, kecepatan yang berkembang dari jari-jari, hal ini dapat dijelaskan dengan persamaan momentum fluida :

$$T = \rho \cdot Q \cdot r \cdot V_t \text{ (Nm)} \dots \dots \dots (3)$$

-Dimana :

- T = Momentum fluida (Nm)
- $\rho$  = Massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- Q = Kapasitas aliran ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- r = Jari-jari jajaran sudu (m)
- $V_t$  = Kecepatan tangensial (m/s)

Agar sistem beroperasi secara efisien perlu diusahakan fluida yang mengalir pada sudu gerak dengan mengganggu yang sekecil-kecilnya. Bila fluida yang meninggalkan sudu gerak pada umumnya berubah, baik besar maupun arahnya dengan demikian momen momentumnya fluida berubah dan fluida melakukan kerja terhadap jajaran sudu tersebut.



Gambar 2.11 Bentuk energi pada aliran air

<sup>(3)</sup> Victor L. Streeter : Fluid Mechnic, Ed 8<sup>th</sup> , Terjemahan Arko Priono, Msc, Jakarta 1990 :



## BAB III

# PERENCANAAN INSTALASI

### III.1. Pengukuran Kapasitas Air Sungai

Kapasitas (debit air sungai) merupakan data yang paling pokok untuk perencanaan pembangkit listrik tenaga air. Kapasitas air sungai harus diukur secara teliti dan kontiniu dalam beberapa tahun sebelum perencanaan atau dalam waktu sepanjang mungkin. Perkalian antara kecepatan rata-rata aliran sungai pada suatu bagian dari penampangnya yang diukur dengan luas penampangnya pada bagian tersebut adalah merupakan kapasitas air sungai.

Pengukuran kapasitas air sungai dapat dilakukan dengan melakukan pengukuran sebagai berikut :

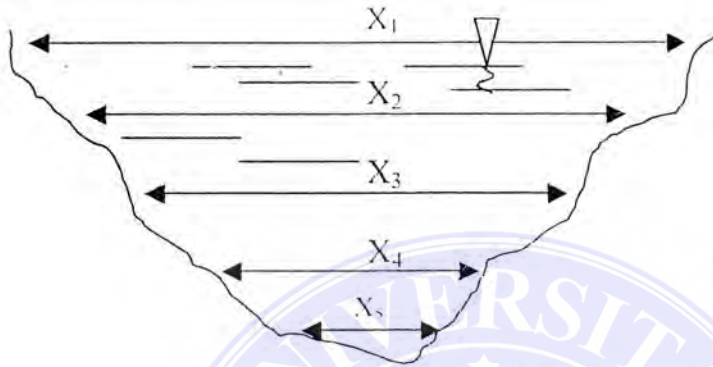
- Pengukuran luas penampang aliran.
- Pengukuran kecepatan aliran.

#### III.1.1. Pengukuran Luas Penampang Aliran Sungai

Pengukuran penampang aliran sungai sangat sulit dilakukan, hal ini dikarenakan bentuk profil haluan air sungai masih alami dan tidak merata. Secara pendekatan dapat dilakukan dengan cara pengukuran lebar dan kedalaman aliran air di beberapa titik pengamatan sehingga diperoleh luas penampang laluan air rata-rata.

**a. Pengukuran lebar aliran sungai**

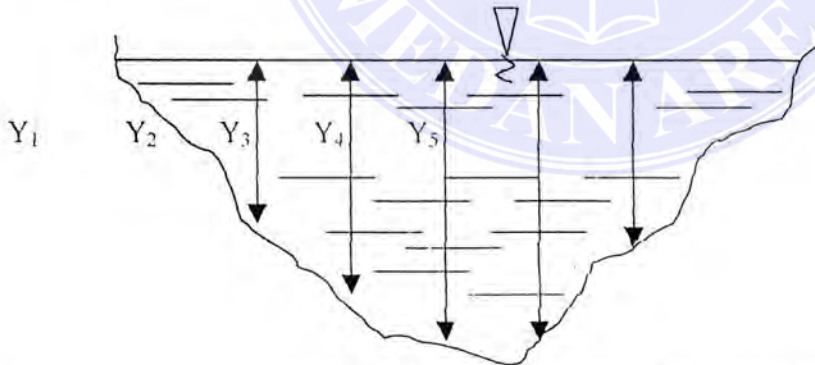
Gambar 3.1 menunjukkan pengukuran lebar aliran sungai dilakukan lima kali pengukuran, yaitu dari bagian permukaan aliran sampai pada bagian dasar sungai. Dan kemudian diambil rata-rata dari pengukuran  $X_r$



Gambar 3.1. Penampang lebar aliran sungai

**b. Pengukuran kedalaman sungai**

Pengukuran kedalaman air sungai seperti di atas yaitu pada pengukuran lebar aliran sungai (gambar 3.2), yaitu untuk tiap titik dilakukan 5 (lima) kali pengukuran dan kemudian diambil rata-rata dari hasil pengukuran  $Y_r$ .



Gambar 3.2. Penampang kedalaman air sungai

Dengan diketahui lebar aliran sungai ( $X_r$ ) dan kedalaman air sungai ( $Y_r$ ), maka luas aliran sungai dapat diperoleh :

$$A = X_r \times Y_r \text{ (m}^3\text{)}$$

### III.1.2. Pengukuran Kecepatan Aliran Sungai

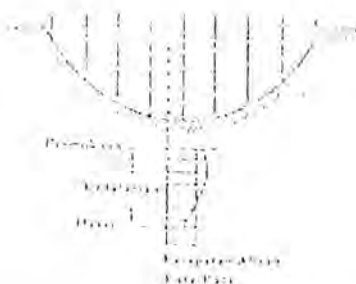
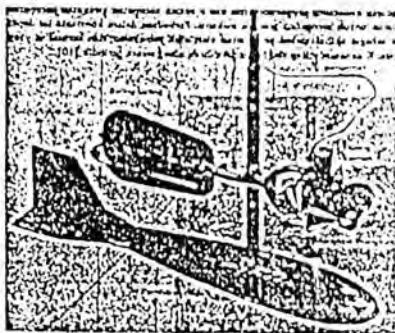
Ada beberapa cara untuk mengukur kecepatan aliran sungai antara lain :

- Dengan alat ukur arus (Current meter)
- Dengan rumus manning dan kutter
- Dengan alat ukur apung.

#### a. Pengukuran dengan alat ukur arus (Current meter)

Current meter ini digantung dengan tali kawat yang dijulurkan dari kabel yang terbentang antara tanggul ke tanggul sungai, kemudian alat ini dimasukkan kedalam sungai. Disini kecepatan aliran dihitung dengan mengukur jumlah putaran alat tersebut dalam satuan waktu. Alat ini mempunyai baling-baling berbentuk pipih atau lengkung (gambar 3.3). Jumlah putaran diukur dengan membuka atau menutup suatu hubungan listrik dengan tachometer.

Untuk mengukur kecepatan aliran sungai, penampang sungai dibagi dalam beberapa garis tegak lurus dengan jarak  $1 \div 3$  m. Tergantung dari lebar penampang melintang aliran. Kecepatan air di ukur pada tiap titik potong dari garis tegak dan mendatar. Dari kecepatan aliran air pada garis tegak dapat dibuat grafik (gambar 3.4), kemudian dapat dihitung kecepatan rata-rata pada penampang melintang dibagian tegak tersebut.



Gambar 3.3. Alat ukur arus  
UNIVERSITAS MEDAN AREA

Gambar 3.4. Pengukuran dengan alat ukur arus



**b. Dengan rumus manning kutter.**

Dengan menggunakan rumus empiris, pertama-tama diukur kemiringan dari permukaan air. Kemudian kecepatan aliran dihitung dengan menggunakan rumus/persamaan manning dan kutter, yaitu :

$$\text{Rumus Manning} \quad : V_m = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Rumus Kutter} \quad : V_m = \frac{\left( 23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{3} \sqrt{RS} \right)}{\left( 1 + 23 \frac{0,00155}{3} \right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana :

- $V_m$  = Kecepatan aliran rata-rata (m/s)
- $R$  = Jari-jari hidrolis (m)
- $S$  = Kemiringan (gradient) permukaan air sungai
- $N$  = Koefisien gesek

Perhitungan dengan rumus ini digunakan apabila alat ukur apung tidak dapat digunakan. Misalnya pada waktu banjir. Alat untuk mengukur kemiringan permukaan air harus dijaga agar supaya tetap dalam keadaan baik pada waktu pengukuran walaupun sungai itu banjir.

**c. Pengukuran dengan menggunakan alat ukur apung.**

Pengukuran kecepatan aliran sungai dilakukan dengan menggunakan alat bantu benda apung seperti : gabus, botol kosong, tabung bambu dan stopwatch. Pengukuran kecepatan aliran dilakukan lima kali tiap satu kali pengukuran .

Benda apung yang dihanyutkan pada permukaan aliran sungai akan terapung/berjalan mengikuti aliran sungai, selanjutnya

<sup>(4)</sup> Dr. Aris Munandar, Dr. S. Kuwahara : Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik jilid I P.T. Pradya

pencatatan waktu yang diperlukan benda apung tersebut untuk mencapai jarak yang telah ditentukan.

Dari seluruh data pengujian dapat dihitung waktu rata-rata yang diperlukan untuk menempuh jarak yang telah ditentukan tersebut. Sehingga kecepatan fluida adalah :

$$V_s = \frac{S}{t_r}$$

Dimana :

$V_s$  = Kecepatan fluida (m/s)

$S$  = Jarak pengukuran (m)

$t_r$  = Waktu rata-rata (s)

Maka kapasitas aliran sungai dapat diperoleh sesuai dengan persamaan :

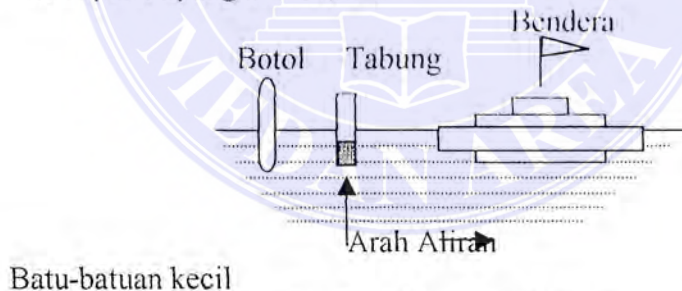
$$Q_s = V_m \cdot A \quad (1)$$

Dimana :

$Q_s$  = Kapasitas aliran sungai ( $m^3/s$ )

$V_m$  = Kecepatan aliran rata-rata (m/s)

$A$  = Luas penampang aliran ( $m^2$ )



Gambar 3.5. Alat Ukur Apung

Pada perencanaan ini penulis tidak menggunakan metode perhitungan kapasitas aliran dengan metode pengukuran diatas berdasarkan spesifikasi tugas.

Kapasitas aliran untuk menggerakkan turbin ditentukan sebesar  $30 m^3/s$ .

### III.2. Perencanaan Pipa Pengantar Atas (Head Race/Low Pressure Pipe)

Perencanaan head race dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan dimensi pipa yang sesuai untuk mengalirkan air  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  dari reservoir sampai dengan surge tank.

#### III.2.1. Perhitungan Pipa

Untuk menunjang dimensi perpipaan yang dibutuhkan, terlebih dahulu ditentukan/dicari kecepatan aliran pada pipa pengantar. Pembatasan kecepatan aliran air pada pipa pengantar sangat penting diperhatikan karena akan mempengaruhi dimensi batang pipa pengantar dan komponen-komponen turbin lainnya. Semakin tinggi kecepatan aliran ( $V$ ), dimensi pipa ( $D$ ) dan komponen-komponen turbin lainnya yang dibutuhkan akan semakin kecil, tetapi kerugian gesekan (friction loss) didalam pipa akan meningkat sebesar  $V^2$ . Dan sebaliknya semakin lambat kecepatan aliran didalam pipa pengantar maka dimensi pipa dan komponen-komponen turbin yang dibutuhkan akan semakin besar tetapi kerugian head akibat gesekan akan semakin menurun. Oleh karena itu penentuan kecepatan/pembatasan kecepatan harus dilakukan selektif mungkin dengan mempertimbangkan hal-hal tersebut diatas.

Kecepatan aliran pada pipa pengantar secara teoritis dapat dihitung dengan persamaan :

$$V = \sqrt{2g \cdot h} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana :

- $V$  = Kecepatan aliran (m/s)
- $G$  = Gravitasi ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $H$  = Perbedaan elevasi (head tekan)

<sup>(7)</sup> PN. Modi and Dr. SM. Seth Hydrolics and Fluid 2<sup>nd</sup> Edition Standart Book House, New Delhi  
 UNIVERSITAS MEDAN AREA  
 1973, Hal. 287



Tetapi karena adanya kerugian energi pada pipa pengantar maka kecepatan aliran aktualnya harus dikali dengan koefisien kecepatan ( $C_v$ ).

Maka :

$$V = C_v \sqrt{2g \cdot h} \dots\dots\dots (8)$$

Material terowongan tekan (head race) dipilih dari beton, sehingga untuk menghindari gesekan yang terlalu besar pada terowongan tekan yang dapat mengikis permukaan bagian dalam terowongan tekan maka kecepatan aliran haruslah sekecil mungkin.

Pada perencanaan ini diambil/ditentukan kecepatan aliran pada terowongan tekan 2,5 m/s.

Berdasarkan persamaan kontinuitas diameter pipa head race dapat ditentukan :

$$Q = V \cdot A$$

Dimana :

- Q = Kapasitas aliran  
= 30 m<sup>3</sup>/s
- V = Kecepatan aliran  
= 2,5 m/s
- A = Luas penampang aliran  
=  $\frac{\pi}{4} \cdot D^2$

Sehingga diperoleh pipa head race :

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}}$$

$$= \sqrt{\frac{4 \times 30}{3,14 \times 2,5}}$$

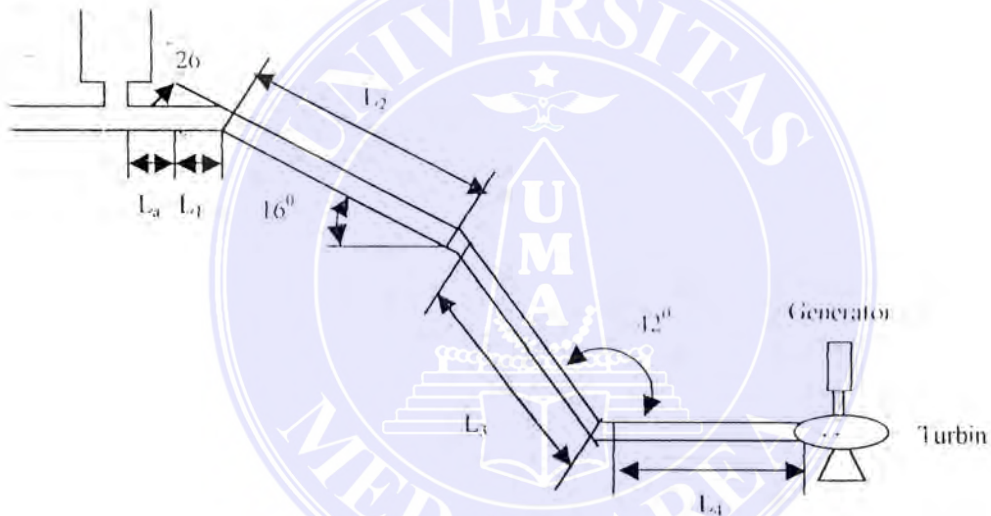
D = 3,9 m. Ditentukan D = do.

### III.3. Perencanaan Pipa Pesat (Penstock)

Perencanaan pipa pesat (Penstock) dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan dimensi yang sesuai mengalirkan air sebesar  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  kerumah turbin.

#### III.3.1. Penentuan Diameter Pipa Pesat (Penstock)

Pada perencanaan ini diameter pipa penstock dibuat bervariasi seperti terlihat pada gambar 3.6, yaitu diameter penstock akan mengecil saat aliran mendekati rumah turbin, sehingga kecepatan akan meningkat saat memasuki rumah turbin dan menghasilkan energi gerak yang lebih besar (energi kinetik).



Gambar 3.6. Skema Instalasi Perencanaan Pipa Pesat (Penstock)

Berdasarkan gambar 3.6 dimensi pipa pesat dapat ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 3.1. Dimensi pipa pesat

No	Panjang (l) m	Diameter (m)
1	$L_1 = 3,0$	$d_1 = 3,4$
2	$L_2 = 41,28$	$d_2 = 3,1$
3	$L_3 = 53,58$	$d_3 = 2,8$
4	$L_4 = 3,4$	$d_4 = 2,6$
5	$L_a = 2,4$	Reduksi 3,9 $\Rightarrow$ 3,4
6	$L_b = 3,1$	Elbow/reduksi 3,4 $\Rightarrow$ 3,1
7	$L_c = 2,8$	Elbow/reduksi 3,1 $\Rightarrow$ 2,8
8	$L_d = 5,7$	Elbow/reduksi 2,8 $\Rightarrow$ 2,6

Dari tabel dapat diketahui panjang pipa pesat (Penstock) :

$$\begin{aligned}
 L &= L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_a + L_b + L_c + L_d \\
 &= 30 + 41,28 + 53,58 + 3,4 + 2,4 + 3,1 + 2,8 + 5,7 \\
 &= 115,9 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Kecepatan aliran dalam pipa pesat saat memasuki rumah turbin dapat diperoleh dengan rumus persamaan :

$$Q = V \cdot A$$

Dimana :

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{Kapasitas aliran (m}^3/\text{s)} \\
 V &= \text{Kecepatan aliran} \\
 &= 30 \text{ m}^3/\text{s} \\
 A &= \text{Luas penampang pipa} \\
 &= \frac{\pi}{4} \cdot d^2
 \end{aligned}$$

Koefisien kecepatan dapat diperoleh dengan persamaan :

$$V = C_v \cdot \sqrt{2g \cdot h}$$



Dimana :

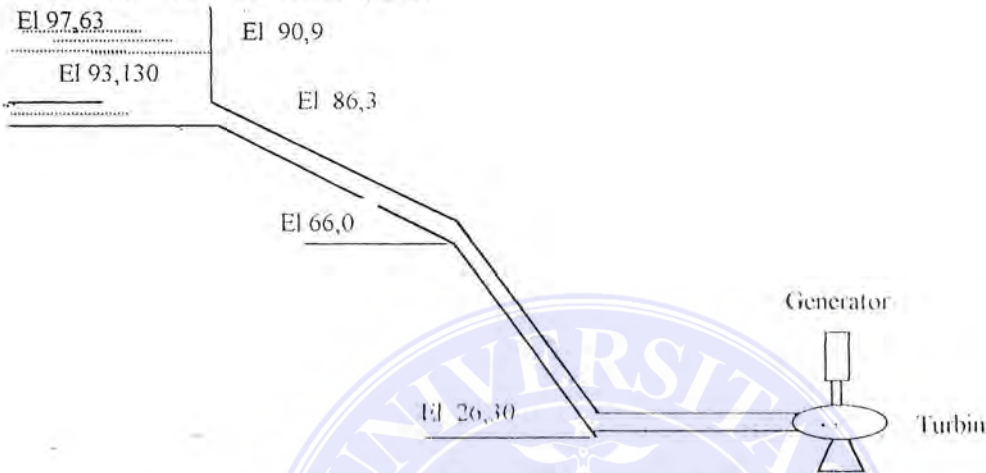
$V$  = Kecepatan aliran

$g$  = Percepatan grafitasi bumi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$h$  = Perbedaan elevasi pemasangan penstock (tinggi head)

=  $\text{El}_{97,63} - \text{El}_0$

$C_v$  = Koefisien kecepatan



Gambar 3.7. Skema Perencanaan Profil PLTA

Dengan menggunakan persamaan-persamaan diatas maka kecepatan dan koefisien kecepatan pada tiap perubahan diameter pipa saat akan memasuki rumah turbin diperoleh Untuk diameter = 3,9 m

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$= \frac{30}{\frac{3,14}{4} \times 3,9^2}$$

$$= 2,5 \text{ m/s}$$

$$h = \text{El}_{97,63} - \text{El}_{93,130} \quad (\text{lihat gambar 3.7})$$

$$= 4,5 \text{ m}$$

$$C_v = \frac{V}{\sqrt{2g \cdot h}}$$

$$= \frac{2,5}{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4,5}} = 0,26$$

Dengan menggunakan rumus yang sama dan dengan memilih beberapa selisih head dan diameter penstock di tiap-tiap titik maka dapat ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 3.2. Perubahan perbandingan kecepatan dan koefisien kecepatan pada setiap diameter pipa instalasi perpipaan

No	Kapasitas Q (m <sup>3</sup> /s)	Head (m)	Diameter Penstock (m)	Kec. Aliran pada Penstock (m/s)	Koefisien Kecepatan
1	30	4,5	3,9	2,5	0,26
2	30	7,62	3,4	3,3	0,27
3	30	11,32	3,1	3,9	0,18
4	30	31,63	2,8	4,87	0,19
5	30	71,3	2,6	5,67	0,15

Berdasarkan buku D.R. Jagdistal : Hydraulic Machine, Mc. Graw hill New Delhi 1980 hal 153, bahwa untuk keamanan material pipa penstock kecepatan aliran max pada pipa pesat (penstock) saat memasuki rumah turbin (casing) adalah :  $V_{max} = 5,65$ , berarti dimensi pipa pesat masih memenuhi syarat.

### III.4. Perhitungan Kehilangan Tinggi Tekan (Head Losses) pada Pipa Pengantar Aliran

Perhitungan head loss pada water way dihitung dari pemasukan (inlet) headrace tunnel sampai tail race melalui head race/low pressure pipa, surge tank, penstock dan turbin.

Dari hasil survey diperoleh bahwa permukaan aliran air tertinggi pada reservoir adalah 97,63 m dan elevasi tail race (permukaan air terendah) adalah 29,30 m, berarti tinggi air jatuh.

$$\begin{aligned}
 H &= 97,63 - 29,30 \\
 &= 68,33 \text{ m} \quad (\text{lihat gambar 3.7})
 \end{aligned}$$

### III.4.1. Perhitungan kehilangan tinggi tekan pada saluran pengantar atas (head race pipa)

#### a. Kehilangan tinggi tekan akibat pemasukan

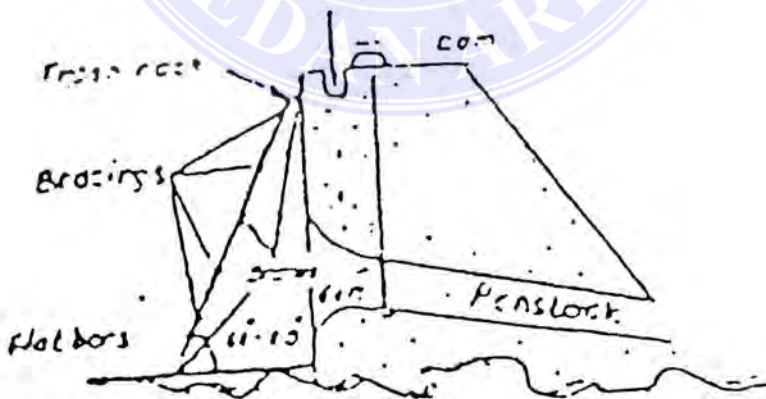
Kehilangan tinggi tekan pada pemasukan disebabkan oleh perubahan arah aliran, juga karena adanya kontraksi mendadak dari luas daerah pembelokan.

Kehilangan tinggi tekan akibat pemasukan dapat dihitung dengan persamaan :

$$h_c = k_c \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana :

- $h_c$  = Head losses akibat pemasukan (m)
- $k_c$  = Koefisien kehilangan tinggi tekan karena pemasukan  
= 0,04 untuk bentuk pemasukan bulat (gambar 3.8)
- $V$  = Kecepatan aliran pada pemasukan terowongan tekan  
= 2,5 m/s
- $g$  = Percepatan gravitasi bumi  
= 9,81 m/s<sup>2</sup>



Gambar 3.8. Penampang aliran masuk headrace



Sehingga :

$$h_c = 0,04 \times \frac{2,5^2}{2 \times 9,81}$$

$$= 0,0012 \text{ m}$$

**b. Kehilangan tinggi tekan karena gesekan ( $h_{fr}$ )**

Kehilangan tinggi tekan karena gesekan (Friction losses) dihitung dengan

menggunakan persamaan :

$$h_{fr} = f \cdot \frac{l \cdot V^2}{d \cdot 2 \cdot g} \dots\dots\dots (10)$$

Dimana :

- $h_{fr}$  = Head losses (m)
- $l$  = Panjang pipa head race  
= 54 m (dari data survey)
- $d$  = Diameter headrace (m)  
= 3,9 m
- $g$  = Percepatan gravitasi (m/s)  
= 9,81 m/s<sup>2</sup>
- $f$  = Koefisien gesek

Berdasarkan koefisien gesek ( $f$ ) adalah tergantung kekasaran pipa dan bilangan Reynold. Bilangan Reynold dapat dihitung dengan persamaan :

$$R_c = \frac{V \cdot d}{\nu} \dots\dots\dots (11)$$

Dimana :

- $R_c$  = Bilangan Reynold
- $d$  = Diameter headrace  
= 3,9 m
- $V$  = Kecepatan aliran  
= 2,5 m/s
- $\nu$  = Viskositas kinematik air pada temperatur 21<sup>o</sup> C  
= 0,985 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s

Bilangan Reynold :

$$R_c = \frac{2,5 \times 3,9}{0,985 \times 10^{-6}}$$

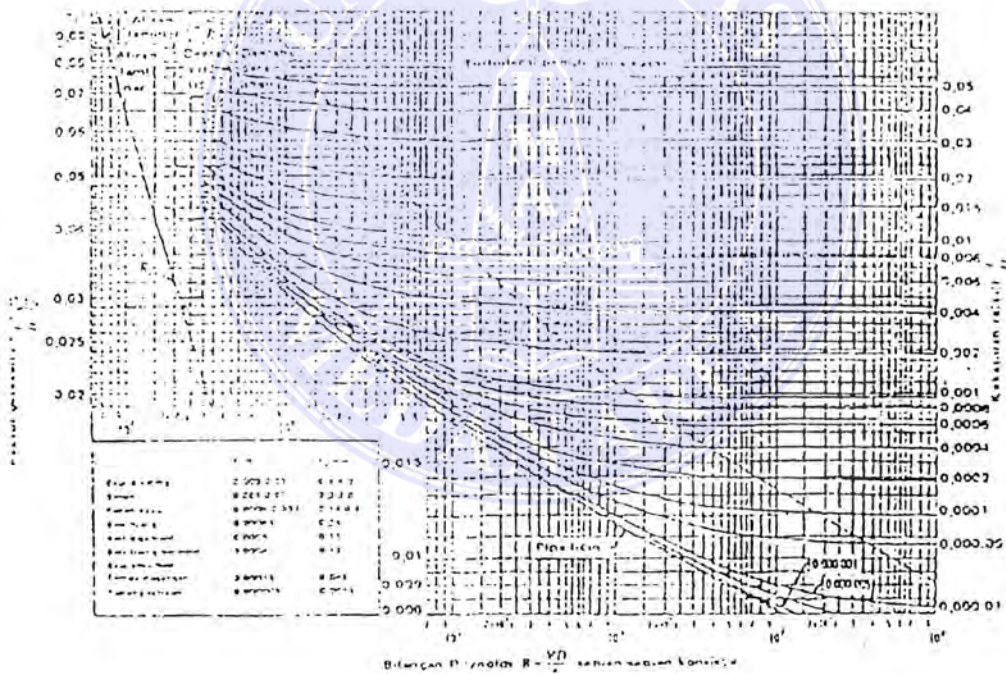
$$= 9,89 \times 10^6$$

Material headrace dipilih beton (Concrete), dari gambar diagram moody, diperoleh

kekasaran absolut :  $(\epsilon) = 0,3 \div 3,0$

$$(\epsilon) = 2,34 \text{ (diambil)}$$

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{2,34}{3900} = 0,0006$$



Gambar 3.9. Diagram Moody

Sehingga dari tabel diperoleh harga koefisien gesek  $f = 0,019$

Dengan demikian diperoleh head losses karena gesekan sebesar

$$h_{fr} = 0,019 \cdot \frac{54 \times 2,5^2}{9,81} = 0,08 \text{ m}$$

UNIVERSITAS MEDAN AREA

c. Kehilangan tinggi tekan akibat pemasangan pintu air (Sluice gate valve) pada saluran atas (head race)

Kerugian tinggi tekan akibat pemasangan pintu air dapat diketahui dengan persamaan

$$h_1 = k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (12)$$

Dimana :

- k = Koefisien kerugian tinggi tekan katup  
= 0,19
- V = Kecepatan aliran  
= 2,5 m/det

Tabel 3.3. Koefisien kerugian tinggi tekan katup

Fitting	K
Globe Valve (fully open)	10,0
Angle Valve (fully open)	5,0
Swing Check Valve ( fully open)	2,5
Gate Valve ( fully open)	0,19
Close Return Bend	2,2
Standard Tee	1,8
Standard Elbow	0,75
Medium Sweep Elbow	0,9
Long Sweep Elbow	0,60

A.H. Gibson, The Conversion of Kinetik to Pressure Energy in the Flow of Water Through Passages Having Divergent Boundaries, Engineering, vol. 93, p. 205, 1912.

Maka :

$$h_1 = 0,19 \cdot \frac{2,5^2}{2 \times 9,81}$$

$$= 0,06$$



Total kerugian tekanan yang terjadi pada saluran atas ( headrace) adalah :

$$\begin{aligned} \Sigma h_l &= h_c + h_{lf} + h_l \\ &= 0,012 + 0,08 + 0,06 \\ &= 0,152 \text{ m} \end{aligned}$$

### III.4.2. Perhitungan Kehilangan Tinggi Tekan pada Pipa Pesat (Penstock)

#### a. Kehilangan tinggi tekan karena gesekan ( $h_{lf}$ )

Kehilangan tinggi tekan karena gesekan sepanjang pipa  $L_1$  :

$$h_{lf} = f \cdot \frac{L_1 \cdot V^2}{d_1 \cdot 2 \cdot g}$$

Dimana :

$h_{lf}$  = Head loss sepanjang  $L_1$  karena gesekan

$L_1$  = Panjang pipa = 3 m (tabel 3.1)

$D_1$  = Diameter pipa penstock = 3,4 m

$V_1$  = Kecepatan aliran pada pipa 2 = 3,3 m / s

$f$  = Koefisien gesek (tergantung kekasaran pipa dan bil. Reynold)

$\nu$  = Viskositas kinematik air (21<sup>o</sup> C) =  $0,985 \times 10^{-6}$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

$$= \frac{3,3 \times 3,4}{0,985 \times 10^{-6}} = 1,139 \times 10^7$$

$$= 1,139 \times 10^7$$

Material penstock dipilih baja dagangan  $\epsilon = 0,046 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon}{D} &= \frac{0,046}{3400} \\ &= 0,000013 \end{aligned}$$

Dari diagram Moody diperoleh harga koefisien gesek  $f = 0,0118$  maka :

$$h_{fr} = 0,0118 \cdot \frac{3 \times 3,3^2}{3,4 \times 2 \times 9,81}$$

$$= 0,0057 \text{ m}$$

Kehilangan tinggi tekan karena gesekan pada pipa tekan sepanjang  $l_2$

$$H_{fr} = f \cdot \frac{l_2 \cdot V_2^2}{D_2 \cdot 2 \cdot g}$$

Dimana :

$$\begin{aligned} D_2 &= \text{Diameter penstock} \quad 3,1 \text{ m} \\ l_2 &= \text{Panjang pipa penstock} \\ &= 41,82 \text{ m} \\ V_2 &= \text{Kecepatan aliran pada pipa 2} \\ &= 3,9 \text{ m/s} \\ f &= \text{Koefisien gesek} \\ v &= 0,985 \times 10^{-6} \\ R_e &= \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{3,9 \times 3,1}{0,985 \times 10^{-6}} \\ &= 1,2 \times 10^7 \end{aligned}$$

Material perinstock baja dagangan  $\varepsilon = 0,046$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,046}{3100} = 0,000014$$

Dari diagram Moody diperoleh harga koefisien gesek

$$f = 0,01184$$

Maka :

$$h_{f2} = 0,01184 \cdot \frac{41,82 \times 3,9^2}{3,1 \times 2 \times 9,81}$$

$$= 0,12 \text{ m}$$

Kehilangan tinggi tekan karena gesekan pada pipa tekan sepanjang  $l_3$

$$h_{f3} = \frac{f \cdot l_3 \cdot V_3^2}{D_3 \cdot 2 \cdot g}$$

Dimana :

- $D_3$  = Diameter penstock  
= 2,8 m
- $l_3$  = Panjang pipa penstock  
= 53,58 m
- $V_3$  = Kecepatan aliran pada pipa 3  
= 4,87 m / s
- $f$  = Koefisien gesek
- $\nu$  = Viskositas kinetika air pada temp  $21^{\circ}C$   
=  $0,985 \times 10^{-6}$
- $Re$  =  $\frac{V \cdot D}{\nu}$   
=  $1,49 \times 10^7$

Material penstock baja dagangan  $\epsilon = 0,046$

Maka :

$$h_{f3} = \frac{0,0123 \cdot 53,58 \cdot 4,87^2}{2,6 \cdot 2 \cdot 9,81} = 0,026 \text{ m}$$

Total head losses akibat gesekan pada pipa penstock :

$$\begin{aligned} \sum h_3 &= 0,0057 + 0,12 + 0,028 + 0,026 \\ &= 0,1979 \text{ m} \end{aligned}$$

### b. Kehilangan tinggi tekan akibat belokan (elbow)

Kehilangan tinggi tekan akibat belokan (bend loss) dapat di hitung dengan menggunakan persamaan :

$$h_{el} = f \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (13)$$



Dimana :

- $h_{el}$  = Kerugian tinggi tekan akibat elbow
- $f$  = Koefisien kerugian elbow
- $g$  = Percepatan gravitasi bumi
- =  $9,81 \text{ m}^2 / \text{det}$

Tabel 3.4 Koefisien Kerugian Elbow

	$0^0$	5	10	15	22,5	30	45	60	90
$f$	Halus	0,016	0,034	0,042	0,066	0,130	0,236	0,471	1,129
	Kasar	0,024	0,44	0,062	0,154	0,165	0,320	0,684	1,265

(Sumber : Sularso, Harou Tahara : Pompa dan Kompresor PT. Pradnya Paramita, Jakarta)

Pada pipa instalasi ini terdapat 3 buah elbow. Masing-masing

- Elbow  $26^0$ . (gambar 3.6)

$$V = 3,3 \text{ m / s}$$

$$D = 3,4 \rightarrow 3,1$$

$f$  diperoleh dengan interpolasi sebagai berikut :

$$\frac{30 - 26}{30 - 22,5} = \frac{0,130 - X}{0,130 - 0,066} \Leftrightarrow \frac{4}{7,5} = \frac{0,130 - X}{0,064}$$

$$\Leftrightarrow 0,975 - 7,5X = 0,256$$

$$\Leftrightarrow 0,975 - 7,5X = -0,719$$

$$\Leftrightarrow X = 0,096$$

Maka :

$$h_{el} = 0,096 \cdot \frac{3,3^2}{2 \cdot 9,81} = 0,053 \text{ m}$$

- Elbow  $16^0$  (gambar 3.6)

$$V = 3,9 \text{ m / s}$$

$$D = 3,1 \rightarrow 2,8$$

f diperoleh dengan interpolasi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{22,5 - 16}{22,5 - 15} &= \frac{0,066 - X}{0,066 - 0,042} \Leftrightarrow \frac{6,5}{7,5} = \frac{0,066 - X}{0,024} \\ &\Leftrightarrow 0,475 - 7,5X = 0,156 \\ &\Leftrightarrow -7,5X = -0,339 \\ &\Leftrightarrow X = 0,045 \end{aligned}$$

Maka :

$$h_{el} = 0,045 \cdot \frac{3,9^2}{2 \times 9,81} = 0,034 \text{ m}$$

- Elbow  $42^\circ$  (gambar 3.6)

$$V = 4,87 \text{ m/s} \quad D = 2,8 \rightarrow 2,6$$

f diperoleh dengan interpolasi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{45 - 42}{45 - 30} &= \frac{0,236 - X}{0,236 - 0,130} \Leftrightarrow 3,54 - 15X = 0,318 \\ &\Leftrightarrow 15X = 3,22 \\ &\Leftrightarrow X = 0,21 \end{aligned}$$

Maka :

$$h_{el} = 0,21 \cdot \frac{4,87^2}{2 \times 9,81} = 0,025 \text{ m}$$

$$\sum h_{el} = 0,053 + 0,034 + 0,025 = 0,337 \text{ m}$$

### c. Kehilangan tinggi tekan pada kutub ( $h_{l,v}$ ) pipa pesat (Penstock)

Pemasangan katub pada instalasi ini berfungsi untuk menutup bilamana turbin tidak beroperasi ataupun penutupan aliran tiba-tiba kalau ada kerusakan pada turbin.

Kerugian tekanan akibat pemasangan gate valve menurut persamaan <sup>(12)</sup> :

$$h_{l,v} = k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Dimana :

$h_{l,v}$	=	Head loss pada gate valve
$k$	=	Koefisien kerugian tinggi tekan pada kutub
	=	0,19
$V$	=	Kecepatan aliran
	=	5,65 m / s

Maka :

$$h_{l,v} = 0,19 \cdot \frac{5,65^2}{2 \times 9,81} = 0,30 \text{ m}$$

Total perhitungan kehilangan tinggi tekan pada saluran pengantar aliran (waterway) yang terjadi mulai dari pemasukan pada reservoir atas hingga ke turbin adalah :

$$\sum h_l = h_l (\text{saluran pengantar atas}) + h_l (\text{pipa penstock}) + h_l (\text{elbow}) + h_l (\text{gate valve}).$$

$$= 0,152 \text{ m} + 0,1797 \text{ m} + 0,337 \text{ m} + 0,30 \text{ m}$$

$$= 0,96 \text{ m}$$

Maka tinggi tekan efektif (Head effective) adalah :

$$H_{\text{eff}} = H_{\text{net}} = \sum h_l$$

$$= 68,33 \text{ m} - 0,96 \text{ m}$$

$$= 67,3 \text{ m}$$

### III.5 Analisa Water Hammer (Pukulan Air)

Pada air adalah merupakan tumbukan air itu atau perubahan kecepatan aliran secara tiba-tiba. Ada beberapa hal yang menyebabkan terjadinya water hammer, antara lain :



### 1. Penutupan Kutub

Penutupan katub pada jalur pipa akan menghentikan aliran fluida sebelum fluida berhenti akan terjadi perubahan tekanan (tekanan anak naik) dan gelombang yang tinggi sehingga terjadi water hammer.

### 2. Penurunan Beban Turbin

Bila beban turbin turun maka kapasitas aliran yang dibutuhkan akan semakin kecil, sehingga sebagai air di dalam pipa akan berlebihan dan tekanan akan naik sehingga menyebabkan water hammer.

### 3. Beban Turbin Naik.

Saat beban turbin naik secara tiba-tiba maka governor akan memperbesar aliran.

Kapasitas pada suatu instalasi pipa sudah tertentu, maka tiba-tiba dibutuhkan kenaikan kapasitas maka mengakibatkan palu air pada instalasi pipa pipa.

Water hammer yang terjadi pada penurunan atau kenaikan beban turbin tidaklah terlalu berbahaya dibandingkan dengan water hammer yang diakibatkan oleh penutupan katub. Sehingga kekuatan pipa terhadap palu air diperhitungkan saat penutupan katub.

Kondisi sebelah hilir (headrace) katub yang ditempatkan sedemikian rupa akan berhubungan langsung dengan tekanan udara luar, sehingga fenomena water hammer pada bagian hilir ini dapat diabaikan, sedangkan pada bagian atau sepanjang pipa pesat tidak dapat diabaikan.

Kecepatan gelombang air didalam pipa pada penutupan katub secara tiba-tiba dapat dihitung dengan persamaan :

$$a = \sqrt{\frac{l}{\left(\frac{\gamma}{g}\right) \left(\frac{l}{k} + \frac{d \cdot c_1}{c \cdot E}\right)}} \dots\dots\dots (14)$$



Waktu untuk terjadinya water hammer setelah katub (valve) tertutup menurut persamaan :

$$T = \frac{2 \cdot L}{a} \quad (17)$$

Dimana :

- L = Panjang pipa yang mengalami water hammer  
= 115,9 m
- a = Kecepatan gelombang tekanan (m/s)  
= 981,18 m/s

Maka :

$$T = \frac{2 \times 115,9}{981,18} \\ = 0,23 \text{ detik}$$

Kenaikan tekanan pada pipa pesat akibat penutupan katub secara tiba-tiba dapat dihitung dengan persamaan :

$$h = \frac{V_0 \cdot a}{g} \quad (16)$$

Dimana :

- $V_0$  = Kecepatan aliran saat memasuki katub (m/s)
- a = Kecepatan gelombang tekan (m/s)  
= 981,18 m/s
- g = Percepatan grafitasi ( $m/s^2$ )  
= 9,81  $m/s^2$
- h = Kenaikan tekanan

Maka :

$$h = \frac{5,65 \times 981,18}{9,81} \\ = 565,1 \text{ mka} = 565,1 \text{ mka} \times 0,1 \text{ kg/cm}^2$$



Bahan yang dipakai untuk pipa penstock adalah baja yang diroll SS. 34. Yang mempunyai  $\sigma_t = 3400 \text{ kg/cm}^2$ . Dengan faktor keamanan  $V = 6 \Rightarrow$  bahan baja carbon.

Sehingga kekuatan tarik izin menjadi :

$$\begin{aligned}\sigma_{t, \text{izin}} &= \frac{3400}{6} \\ &= 566,6 \text{ kg/cm}^2\end{aligned}$$

Dari perhitungan di atas ternyata tekanan yang timbul akibat water hammer lebih kecil dari tekanan yang diizinkan, maka pipa pesat aman terhadap pengaruh water hammer dan pemasangan pipa ini juga diletakkan pada terowongan bawah tanah dan dicor keliling permukaan luar pipa, sehingga pipa penstock ini aman akibat getaran air dalam pipa.

### III.6. Tangki Peredam Gelombang (Surge Tank)

Gelombang tekanan akan terjadi akibat penutupan katub yang secara tiba-tiba ataupun akibat pengaturan kapasitas aliran pada turbin. Gelombang ini agak lunak pada sistim pipa yang pendek atau pada penutupan katub yang perlahan-lahan.

Tetapi pada instalasi pipa untuk turbin air dimana sistem pemipaan cukup panjang dan governor ataupun katub sering di tutup/dibuka secara cepat, efek palu air yang terjadi adalah cukup serius. Untuk itu dipakai tangki peredam gelombang yang fungsinya antara lain :

- a. Untuk menghindari refleksi gelombang sepanjang pipa dengan membuat ujung surge tank yang lebih dekat dengan inlet valve
- b. Pada kenaikan beban yang tiba-tiba, tambahan air dapat diberi dengan cepat dengan bantuan air dari surge tank

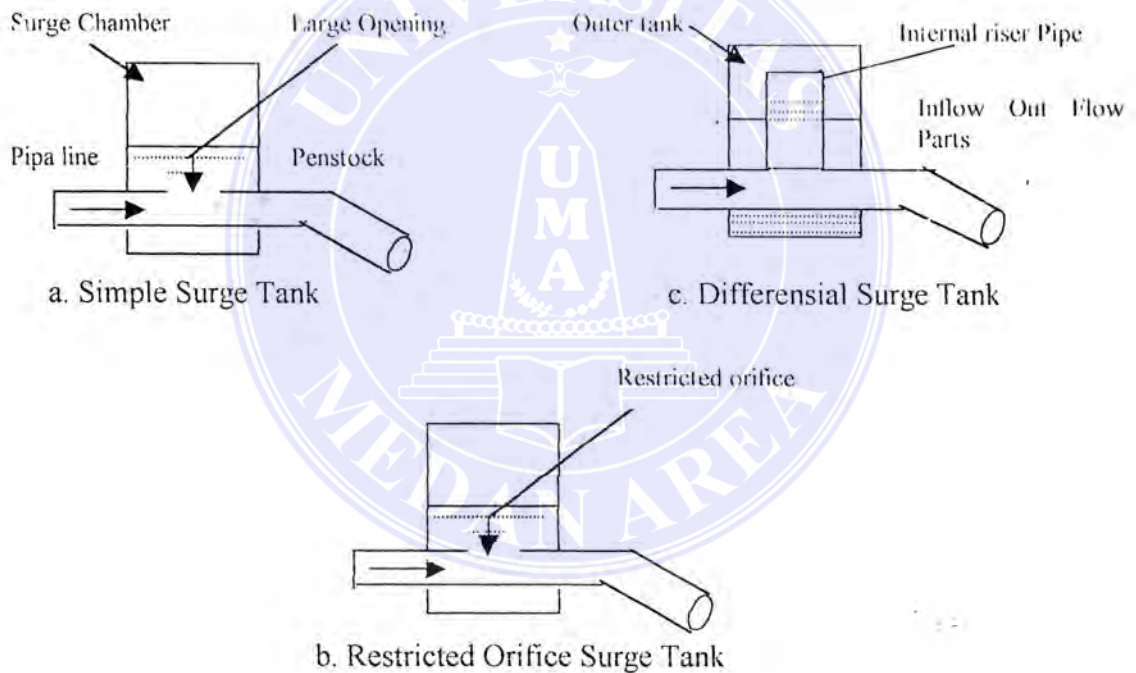
c. Sebagai bandul peredam gelombang tekanan yang timbul seperti hanya palu air. (menetralkan gelombang)

d. Pada penurunan beban yang tiba-tiba, surge tank dapat menyimpan air dengan cepat.

Jenis-jenis Surge Tank (lihat gambar 3.10)

- Simple surge tank
- Restricted orifice surge tank
- Differensial surge tank

Pada perencanaan instalasi PLTA ini digunakan surge tank type **Restricted orifice** dengan diameter : 8,0 m, tinggi : 42,4 m.



Gambar 3.10. Jenis-jenis surge tank

## BAB VII

### KESIMPULAN

Pembangkit listrik tenaga air merupakan salah satu alternatif dalam menanggulangi kebutuhan energi listrik dalam kehidupan masyarakat modern. Mengingat terbatasnya persediaan minyak bumi dan gas pada lapisan perut bumi.

Pada perencanaan ini instalasi turbin terdapat fasilitas-fasilitas lainnya yang mendukung sistem turbin antara lain : bendungan, saluran air, kolam pengendap pasir, rumah instalasi, katub dan lain-lain.

Dengan mempertimbangkan dan berdasarkan ketersediaan air maka pada perencanaan ini ditentukan kapasitas air yang digunakan untuk menggerakkan turbin adalah sebesar  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan  $h_{\text{eff}} = 67,3 \text{ m}$  dan menghasilkan daya turbin sebesar 17,6 MW.

Turbin air yang direncanakan adalah jenis turbin Francis dengan putaran spesifik  $n_s = 300 \text{ rpm}$  dan putaran kerja turbin ( $N_j$ ) = 375 rpm, posisi poros turbin dipilih poros vertikal.

Data-data hasil perencanaan selengkapnya dapat dilihat pada uraian berikut :

1. Pipa head race (Low pressure pipe)
  - Diameter : 3,9 m
  - Panjang : 54 m
  - Bahan : Beton
  - Jenis : Terowongan tekan



## 2. Pipa pesat (Penstock)

- Diameter : 2,6 ÷ 3,4 m
- Tebal : 0,02 m
- Panjang : 115 m
- Bahan : Baja Yang diroll SS 34

## 3. Turbin Air

- Jenis : Francis poros vertikal
- Daya : 17,6 MW
- Kapasitas pembangkit : 30 m<sup>3</sup>/s
- Head actual : 68,3 m
- Head efektif : 67,3 m
- Putaran kerja : 375 rpm
- Putaran spesifik : 300 rpm

## 4. Sudu gerak (runner)

- Jumlah sudu : 17 buah
- Diameter runner sisi masuk : 1,35 m
- Diameter runner sisi keluar : 2,44 m
- Tebal sudu : 25 mm
- Bahan : Stainless Steel SC 56

## 5. Sudu pengarah (Guide vane)

- Jumlah : 16 buah
- Diameter ujung-ujungnya : 1,48 m
- Panjang : 444 mm

- Bahan : Stainless Steel

#### 6. Rumah Turbin (Scroll Casing)

- Jenis : Close flume type
- Jari-jari penampang terkecil : 1,4 m
- Jari-jari penampang terbesar : 4,0 m
- Tebal : 5,96 mm
- Bahan : JIS. G. 3108 SS 41B-D

#### 7. Pipa lepas (Draft tube)

- Jenis : Straight tube
- Diameter sisi masuk draft tube : 2,44 m
- Diameter sisi keluar draft tube : 3,72 m
- Material : JIS. G. 3108 SS 41

#### 8. Daya

- 1 Watt = 1 J/S = 1/1000 KW
- Daya Kuda Metrik : 1 PS = 75 kg.m/s = 0,7355 KW = 0,9863 Hp
- Daya Kuda Non Metrik : 1 Hp = 550 ft.lb/s = 0,7475 KW = 1,014 Ps

## DAFTAR LITERATUR

1. Marine Auxilary : Machinery And System, Translated From The Rusian, By Nicholas Wieten.
2. MM. Dandekar KN. Sharma : Pembangkit Listrik Tenaga Air.
3. Victor L. Stueber : Fluida Mechanics, Ed 8<sup>th</sup>, terjemahan Arko Priono, Msc, Erlangga, Jakarta, 1975.
4. PN. Modi And DR. SM. Seth : Hydrolics And Fluid 2<sup>nd</sup>, Edition Standard Book House New Delhi, 1975.
5. Frank M. White : Mekanika Fluida Jilid 2 Edisi 2, Penerbit Erlangga.
6. Robert L. Dougherty, Joseph B. Franzini : Fluida Mechanic With Engineering Aplication, Mc. Graw Hill Book Company New York, 1977.
7. DR. A. Arismunandar, DR. S. Kuwahara : Buku Pegangan TTL Jilid I, PT. Pradya Paramitha, Jakarta, 1975.
8. DR. Ir. Hariyono Djojodiharjo : Mekanika Fluida, Erlangga, Jakarta, 1983.
9. Sularsi Tahara Harno : Pipa dan Kompresor Ed 4<sup>th</sup>, PT. Pradya Paramitha, Jakarta, 1991.
10. CC. Warnick : Hydro Power Engineering Prentice – Hall. Ine engelwood Cliffs, New Jersey, 1984.
11. MM. Resmukh : Water Power Engineering First Edition, Dampath Rai A Nai Sarak, Delhi, 1978.
12. Wiranto Arismunandar : Penggerak Mula Turbin edisi 5<sup>th</sup>, Penerbit ITB, Bandung, 1973.
13. DR. Jagdislal : Hydrolic Machine, MC. Graw Hill New Delhi, 1980.
14. S. Ramamutham : Hydroulic Fluid Machine and Fluid Machine Ed 2<sup>nd</sup>, Dampat Rai & Sons Nai Sarak, Delhi, 1982.
15. Austin H Crunch : Pompa dan Blower Sentrifugal, Terjemahan Marzuki harahap, Erlangga, 1984.
16. Ir. Sularso Kiyotsu Suga : Element Mesin, PT. Pradya Paramiyha, Jakarta, 1985.