

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Tinjauan Umum PLTMH

Mikrohidro hanyalah sebuah istilah. Mikro artinya kecil sedangkan Hidro artinya air. Dalam prakteknya istilah ini tidak merupakan sesuatu yang baku namun Mikro Hidro, pasti menggunakan air sebagai sumber energinya. Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), juga mempunyai suatu kelebihan dalam hal biaya operasi yang rendah jika dibandingkan dengan Pembangkit Listrik seperti Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan Pembangkit Listrik lainnya karena Mikro Hidro memanfaatkan energi sumber daya alam yang dapat diperbarui, yaitu sumber daya air. Dengan ukurannya yang kecil penerapan Mikro Hidro relatif mudah dan tidak merusak lingkungan. Rentang penggunaannya cukup luas, terutama untuk menggerakkan peralatan atau mesin-mesin yang tidak memerlukan persyaratan stabilitas tegangan yang akurat (Endardjo, et, all 1998). PLTMH adalah termasuk dalam kategori PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro), karena prinsip kerja dan cara pembuatan PLTMH tersebut sama dengan PLTA umumnya. PLTMH juga dapat dikatakan sebagai PLTA berkapasitas kecil. Akhir - akhir ini di dunia

termasuk negara-negara maju, banyak terdapat pembangunan PLTA berkapasitas kecil. Pembagian PLTA dengan kapasitas kecil pada umumnya adalah sebagai berikut:

1. PLTA Mikro < 100 kW
2. PLTA Mini 100 - 999 kW
3. PLTA Kecil 1000 - 10000 kW

Salah satu sebab bagi negara-negara maju membangun PLTA berkapasitas kecil ini adalah dikarenakan harga minyak OPEC yang terus meningkat, dan di samping bertambahnya kebutuhan listrik di negara-negara maju tersebut (Patty,1995).

Mikro Hidro adalah istilah yang digunakan untuk suatu pembangkit listrik yang menggunakan energi air. Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggiannya dari instalasi maka semakin besar energi yang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. PLTMH umumnya merupakan pembangkit listrik jenis *run of river* dimana *head* (jatuhan tinggi air) diperoleh tidak dengan cara membangun sebuah bendungan yang besar, melainkan dengan mengalihkan aliran air sungai ke satu sisi dari sungai tersebut selanjutnya mengalirkannya lagi ke sungai pada suatu tempat dimana beda tinggi yang diperlukan sudah diperoleh. Air dialirkan ke *power house* (rumah pembangkit) yang biasanya dibangun dipinggir sungai. Air akan memutar sudu turbin (*runner*), kemudian air tersebut dikembalikan ke sungai asalnya. Energi mekanik dari putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh sebuah generator.(Anonim, 2010)

B. Klasifikasi dari Pembangkit Listrik Tenaga Air

Klasifikasi dari pembangkit listrik tenaga air perlu ditentukan terlebih dulu untuk mengetahui karakteristik tipe pembangkit listrik, mengklasifikasikan sistem pembangkit listrik perlu dilakukan terkait dengan sistem distribusi energi listrik. Klasifikasi pembangkit listrik dapat ditentukan dari beberapa faktor yakni:

1. Berdasarkan tinggi jatuh (*head*)
 - Rendah (< 50 m)
 - Menengah (antara 50 m dan 250 m)
 - Tinggi (> 250 m)
2. Berdasarkan tipe eksploitasi
 - Dengan regulasi aliran air (tipe waduk)
 - Tanpa regulasi aliran air (tipe *run off river*)
3. Berdasarkan sistem pembawa air
 - Sistem bertekanan (pipa tekan)
 - Sirkuit campuran (pipa tekan dan saluran)
4. Berdasarkan penempatan rumah pembangkit
 - Rumah pembangkit pada bendungan
 - Rumah pembangkit pada skema pengalihan
5. Berdasarkan metode konversi energi
 - Pemakaian turbin
 - Pemompaan dan pemakaian turbin terbalik

6. Berdasarkan tipe turbin

- Impulse
- Reaksi
- Reversible

7. Berdasarkan kapasitas terpasang

- Mikro (< 100 kW)
- Mini (antara 100 kW dan 500 Kw)
- Kecil (antara 500 kW dan 10 MW)

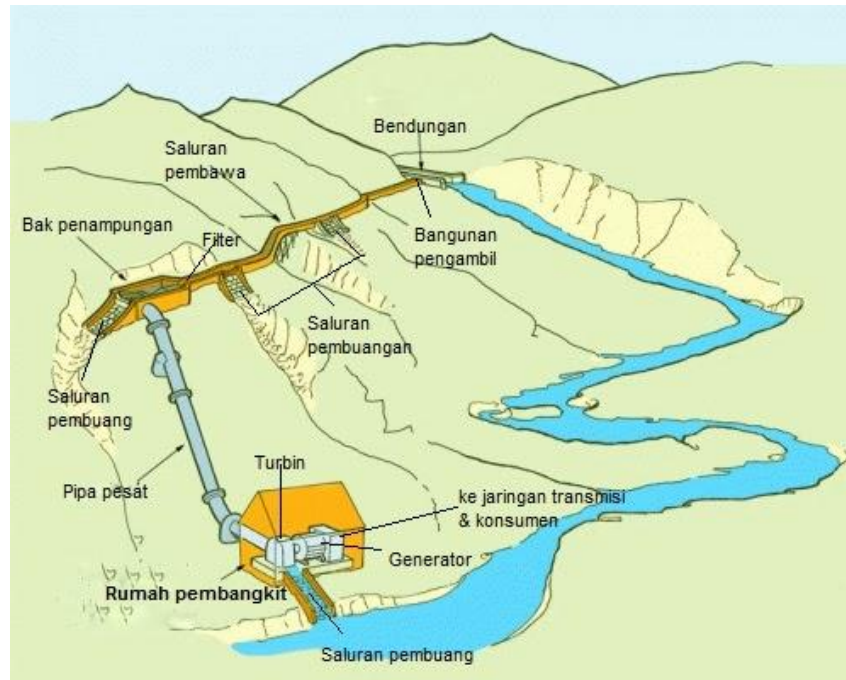
8. Berdasarkan debit desain tiap turbin

- Mikro ($Q < 0,4 \text{ m}^3/\text{dt}$)
- Mini ($0,4 \text{ m}^3/\text{dt} < Q < 12,8 \text{ m}^3/\text{dt}$)
- Kecil ($Q > 12,8 \text{ m}^3/\text{dt}$)

(Penche,1998)

C. Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Secara teknis PLTMH memiliki tiga komponen utama yaitu air (Hidro), turbin, dan generator. Prinsip kerja dari PLTMH sendiri pada dasarnya sama dengan PLTA hanya saja PLTMH kapasitasnya tidak begitu besar. PLTMH pada prinsipnya memanfaatkan beda ketinggian atau sudut kemiringan dan jumlah debit air per detik yang ada pada saluran irigasi, sungai, serta air terjun. Aliran air akan memutar turbin sehingga akan menghasilkan energi mekanik. Energi mekanik turbin akan memutar generator dan generator menghasilkan listrik. Skema prinsip kerja PLTMH dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.1 Skema Prinsip Kerja PLTMH

(Ezkhelenergy,2013)

Untuk lebih detailnya, prinsip kerja dari Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) adalah sebagai berikut:

1. Aliran sungai dibendung agar mendapatkan debit air (Q) dan tinggi jatuh air (H), kemudian air yang dihasilkan disalurkan melalui saluran penghantar air menuju kolam penenang.
2. Kolam penenang dihubungkan dengan pipa pesat, dan pada bagian paling bawah di pasang turbin air.
3. Turbin air akan berputar setelah mendapat tekanan air (P), dan perputaran turbin dimanfaatkan untuk memutar generator.
4. Setelah mendapat putaran yang konstan maka generator akan menghasilkan tegangan listrik, yang dikirim ke konsumen melalui saluran kabel distribusi.(Ezkhelenergy,2013)

D. Kriteria Kelayakan PLTMH

Untuk mengadakan pembangunan PLTMH, sebelumnya harus diketahui dahulu kriteria kelayakannya. Kriteria-kriteria kelayakan PLTMH dapat ditentukan dengan langkah awal yaitu:

1. Bangunan Sipil

Fasilitas untuk bangunan sipil PLTMH terdiri dari:

a. Bendung (*weir*)

Bendung berfungsi untuk menaikkan/mengontrol tinggi air dalam sungai secara signifikan sehingga memiliki jumlah air yang cukup untuk dialihkan ke dalam intake pembangkit mikrohidro

b. Bangunan penyadap air (*intake*)

Tujuan dari bangunan penyadap air (*intake*) adalah untuk memisahkan air dari sungai atau kolam untuk dialirkan ke dalam saluran pembawa, *penstock*, serta ke bak penampungan.

c. Saluran pembawa (*head Race*)

Saluran pembawa (*head race*) mengikuti kontur permukaan bukit untuk menjaga energi dari aliran air yang disalurkan.

d. Penyaring (*trashrack*) dan Bak penenang (*forebay*)

Trashrack digunakan untuk menyaring muatan sampah dan sedimen yang masuk, umumnya penyaring direncanakan dengan menggunakan jeruji besi. Sedangkan fungsi dari bak penenang adalah sebagai penyaring terakhir seperti *settling basin* untuk menyaring benda-benda

yang masih tersisa dalam aliran air, dan merupakan tempat permulaan pipa pesat (*penstock*) yang mengendalikan aliran menjadi minimum sebagai antisipasi aliran yang cepat pada turbin tanpa menurunkan elevasi muka air yang berlebihan dan menyebabkan arus baik pada saluran.

e. Saluran Pelimpas (*spill way canal*)

Spillway adalah sebuah lubang besar di dam (bendungan) yang sebenarnya adalah sebuah metode untuk mengendalikan pelepasan air untuk mengalir dari bendungan atau tanggul ke daerah hilir.

f. Pipa pesat (*pen stock*)

Pipa pesat (*penstock*) berfungsi untuk menyalurkan dan mengarahkan air ke cerobong turbin. Diameter ekonomis pipa pesat dapat dihitung dengan persamaan (Penche,1998) :

$$D_p = 2,69 \left(\frac{n^2 \cdot Q^2 \cdot L_p}{H} \right)^{0,1875} \quad (2.1)$$

Dimana:

D_p = diameter pipa penstock

n = koefisien kekasaran material, untuk bahan PVC $n = 0,009$

Q = kapasitas aliran

L_p = panjang pipa pesat

H = tinggi jatuh air

pK_s = jarak sumber air ke turbin

g. Rumah Pembangkit (*power house*)

Rumah pembangkit merupakan tempat peralatan di mana terdapat komponen elektrik dan mekanik terpasang. Pada bangunan ini komponen yang ada di dalamnya adalah turbin, generator dan peralatan control.

h. Saluran pengeluaran (*tail race*)

Saluran pengeluaran (*tail race*) berfungsi untuk mengalirkan air dari rumah pembangkit (*housepower*) setelah digunakan untuk memutar turbin ke saluran asal. Konstruksi yang digunakan harus memiliki kemiringan dan dimensinya karena nantinya dapat berpengaruh pada besarnya debit yang dialirkan ke dalam saluran air. (Ramli K.,2010)

2. Mekanikal

Untuk komponen-komponen mekanikalnya yang utama pada perencanaan pembangunan PLTMH ini terdiri dari:

a. Turbin

Pesawat yang digunakan untuk mengkonversi energi potensial menjadi mekanik berupa putaran pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) disebut turbin. Putaran poros turbin ini ditransmisikan ke generator untuk membangkitkan listrik.

b. Sistem Transmisi

Sistem Transmisi yang digunakan adalah menggunakan sabuk dan puli. Sistem transmisi berfungsi untuk menaikkan putaran dari putaran turbin ke putaran generator. Bagian sistem transmisi terdiri dari:

- Puli adalah roda berbentuk lingkaran yang digunakan untuk menempatkan sabuk. Puli sebanyak 2 buah yaitu puli penggerak di turbin dan puli yang digerakkan di generator.
- Poros transmisi digunakan untuk menopang puli di antara bantalan.
- Sabuk (*belt*) berfungsi sebagai pemindah daya dari turbin ke generator.
- Bantalan pada sistem transmisi digunakan sebagai tempat berputarnya poros puli.
- Kopling berfungsi untuk menghubungkan daya dari poros turbin ke puli penggerak dan dari poros puli ke poros generator yang digerakkan. Kopling juga digunakan untuk memisahkan turbin dan generator dari sistem transmisi apabila akan dilakukan perbaikan.

3. Elektrikal

Komponen yang utama dari elektrikal adalah generator dan panel Kontrol.

Secara rinci komponen elektrikal untuk sebuah PLTMH yaitu:

a. Generator

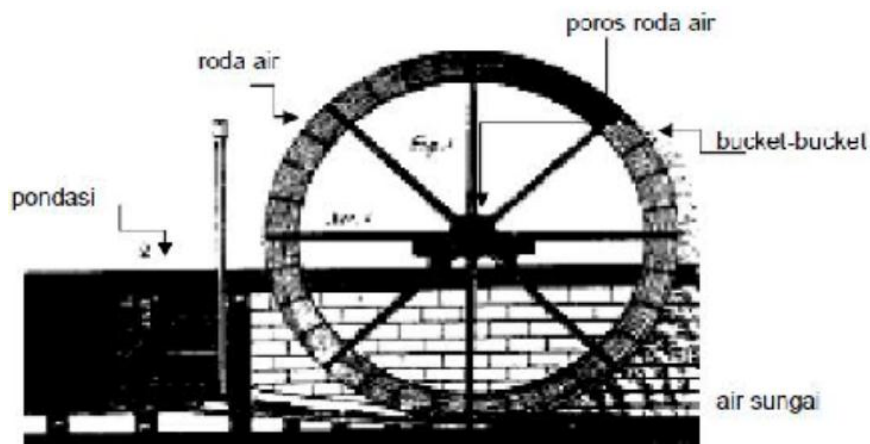
Generator adalah alat pengubah tenaga mekanik yang berupa putaran yang dihasilkan turbin menjadi energi listrik.

b. Panel Kontrol

Panel Kontrol merupakan tempat peralatan untuk mengontrol dan memonitor listrik yang dibangkitkan untuk memenuhi standard kualitas listrik yang berlaku.

E. Sejarah Turbin Air

Orang Cina dan Mesir kuno sudah menggunakan turbin air sebagai tenaga penggerak. Pada gambar 2.2 adalah contoh turbin air paling kuno, biasa dinamai roda air. Roda air dengan poros horizontal dipasang pada aliran sungai, sebagian dari roda air dimasukan ke aliran sungai, sehingga *bucket-bucket* terisi air dan terdorong. Karena dorongan itulah roda air berputar dan menghasilkan daya rendah dengan efisiensi rendah.



Gambar 2.2 Roda air kuno

(Young H.D dan Freedman R.A. 2001)

Ján Andrej Segner mengembangkan turbin air reaksi pada pertengahan tahun 1700. Turbin ini mempunyai sumbu horizontal dan merupakan awal mula dari turbin air modern. Turbin ini merupakan mesin yang simpel yang masih diproduksi saat ini untuk pembangkit tenaga listrik skala kecil. Segner bekerja dengan Euler dalam membuat teori matematis awal untuk desain turbin. (Young H.D dan Freedman R.A. 2001)

F. Klasifikasi Turbin Air

Turbin merupakan bagian penting dari sistem mikro hidro yang menerima energi potensial dari air dan mengubahnya menjadi energi putaran (mekanik). Kemudian energi mekanik ini akan memutar sumbu turbin pada generator. Terdapat beberapa jenis turbin menurut teknologinya, antara lain :

1. Turbin Tradisional, biasanya terbuat dari bambu atau kayu.
2. Turbin Modern, biasanya digunakan pada proyek – proyek PLTMH berdana besar. Turbin jenis ini yang paling banyak digunakan adalah turbin jenis *Kaplan, Francis, Cross Flow*, dan *Pelton*.
3. Turbin Modifikasi, dibuat dengan memodifikasi jenis turbin yang telah ada.

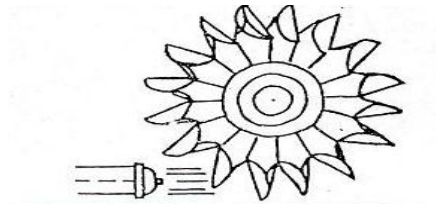
Dengan kemajuan ilmu Mekanika fluida dan Hidrolika serta memperhatikan sumber energi air yang cukup banyak tersedia di pedesaan akhirnya timbullah perencanaan-perencanaan turbin yang divariasikan terhadap tinggi jatuh (head) dan debit air yang tersedia. Dari itu maka masalah turbin air menjadi masalah yang menarik dan menjadi objek penelitian untuk mencari sistem, bentuk dan ukuran yang tepat dalam usaha mendapatkan efisiensi turbin yang maksimum. Pada uraian berikut akan dijelaskan pengklasifikasian turbin air berdasarkan beberapa kriteria.

1. Berdasarkan Model Aliran Air Masuk *Runner*.

Berdasarkan model aliran air masuk *runner*, maka turbin air dapat dibagi menjadi tiga tipe yaitu :

a. Turbin Aliran Tangensial

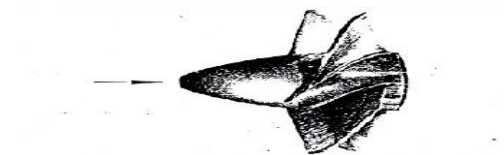
Pada kelompok turbin ini posisi air masuk *runner* dengan arah tangensial atau tegak lurus dengan poros runner mengakibatkan *runner* berputar, contohnya *Turbin Pelton* dan *Turbin Cross-Flow*.



Gambar 2.3 Turbin Aliran Tangensial (Haimerl, L.A., 1960)

b. Turbin Aliran Aksial

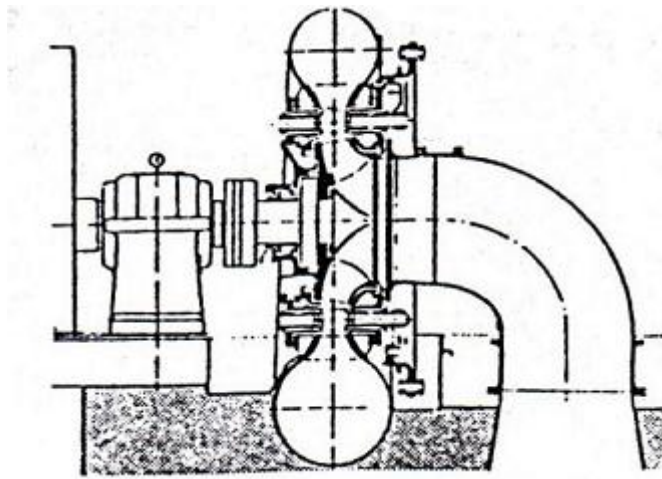
Pada turbin ini air masuk *runner* dan keluar *runner* sejajar dengan poros *runner*, *Turbin Kaplan* atau *Propeller* adalah salah satu contoh dari tipe turbin ini.



Gambar 2.4 Model Turbin Aliran Aksial (Haimerl, L.A., 1960)

c. Turbin Aliran Aksial - Radial

Pada turbin ini air masuk ke dalam *runner* secara radial dan keluar *runner* secara aksial sejajar dengan poros. *Turbin Francis* adalah termasuk dari jenis turbin ini.



Gambar 2.5 Model Turbin Aliran Aksial- Radial (Haimerl, L.A., 1960)

2. Berdasarkan Perubahan Momentum Fluida Kerjanya

Dalam perubahan momentum fluida kerjanya turbin air dapat dibagi atas dua tipe yaitu :

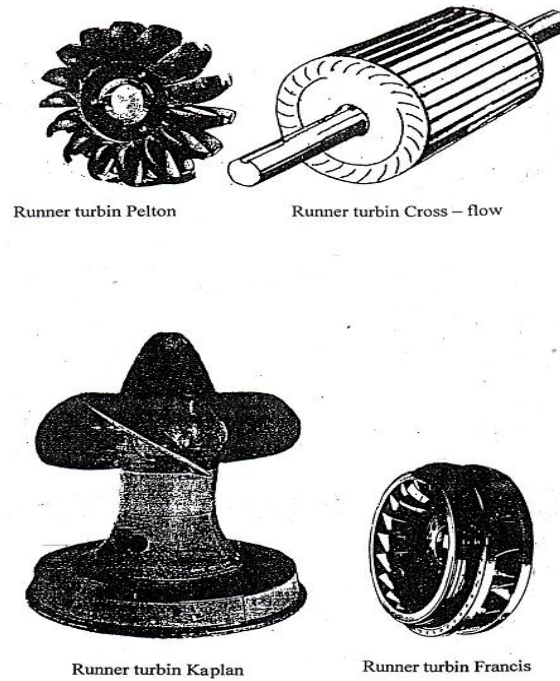
a. Turbin Impuls.

Semua energi potensial air pada turbin ini dirubah menjadi menjadi energi kinetik sebelum air masuk/ menyentuh sudu-sudu *runner* oleh alat pengubah yang disebut nozel. Yang termasuk jenis turbin ini antara lain : *Turbin Pelton* dan *Turbin Cross-Flow*.

b. Turbin Reaksi.

Pada turbin reaksi, seluruh energi potensial dari air dirubah menjadi energi kinetik pada saat air melewati lengkungan sudu- sudu pengarah, dengan demikian putaran *runner* disebabkan oleh perubahan momentum oleh air. Yang termasuk jenis turbin reaksi diantaranya : *Turbin Francis*, *Turbin Kaplan* dan *Turbin Propeller*. Gambar 2.7 menjelaskan bentuk

kontruksi empat macam runner turbin *konvensional*. (Haimerl, L.A., 1960)



Gambar 2.6 Empat Macam *Runner Turbin Konvensional*

(Haimerl, L.A., 1960)

3. Kriteria Pemilihan Jenis Turbin

Pada tahap awal, pemilihan jenis turbin dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan parameterparameter khusus yang mempengaruhi sistem operasi turbin, yaitu :

- a. Faktor tinggi jatuhan air efektif (*Net Head*) dan debit yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin merupakan faktor utama yang mempengaruhi pemilihan jenis turbin, sebagai contoh: turbin pelton efektif untuk operasi pada head tinggi, sementara turbin proppeller sangat efektif beroperasi pada head rendah.

- b. Faktor daya (*Power*) yang diinginkan berkaitan dengan head dan debit yang tersedia.
- c. Kecepatan (*Putaran*) turbin yang akan ditransmisikan ke generator. Sebagai contoh untuk sistem transmisi *direct couple* antara generator dengan turbin pada head rendah, sebuah turbin reaksi (*propeller*) dapat mencapai putaran yang diinginkan, sementara turbin pelton dan crossflow berputar sangat lambat (*low speed*) yang akan menyebabkan sistem tidak beroperasi. Ketiga faktor (*net head, power, putaran*) di atas seringkali diekspresikan sebagai "kecepatan spesifik, N_s ."

4. Kecepatan Spesifik (n_s)

Yang dimaksud dengan kecepatan spesifik dari suatu turbin ialah kecepatan putaran *runner* yang dapat dihasilkan daya efektif untuk setiap tingginya atau dengan rumus dapat ditulis (Haimerl.1960):

$$N = \frac{n_{11}}{D} \sqrt{H_{net}} \quad (2.2)$$

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H_{efs}^{\frac{5}{4}}} \quad (2.3)$$

Dimana:

N_s = kecepatan spesifik turbin (*rpm*)

N = kecepatan putaran turbin (*rpm*)

H_{efs} = tinggi jatuh efektif (*m*)

P = daya turbin *output* (*kW*)

Sebagai pedoman untuk mengetahui daya yang dapat dihasilkan pada studi kelayakan pembangunan PLTMH, secara umum dapat dipakai pedoman rumus persamaan atau diagram sebagai berikut (Fox dan Mc Donald, 1995):

$$P = \rho \times Q \times H \times \eta \times g \quad (2.4)$$

Dimana :

P = daya turbin (*Watt*)

Q =debit air (m^3/s)

ρ = massa jenis air (kg/m^3)

g = gaya grafitasi (m/s^2)

H = efektif head (m)

η = efisiensi turbin

Setiap turbin air memiliki nilai kecepatan spesifik masing-masing, tabel 2.1 menjelaskan batasan kecepatan spesifik untuk beberapa turbin *kovensional*.

Tabel 2.1 Kecepatan Spesifik Turbin *Konvensional* (Lal, Jagdish, 1975)

No	Jenis Turbin	Kecepatan Spesifik
1.	<i>Pelton dan kincir air</i>	10 - 35
2.	<i>Francis</i>	60 - 300
3.	<i>Cross-Flow</i>	40 - 200
4.	<i>Kaplan dan propeller</i>	250 - 1000

5. Berdasarkan Head dan Daya yang dibangkitkan.

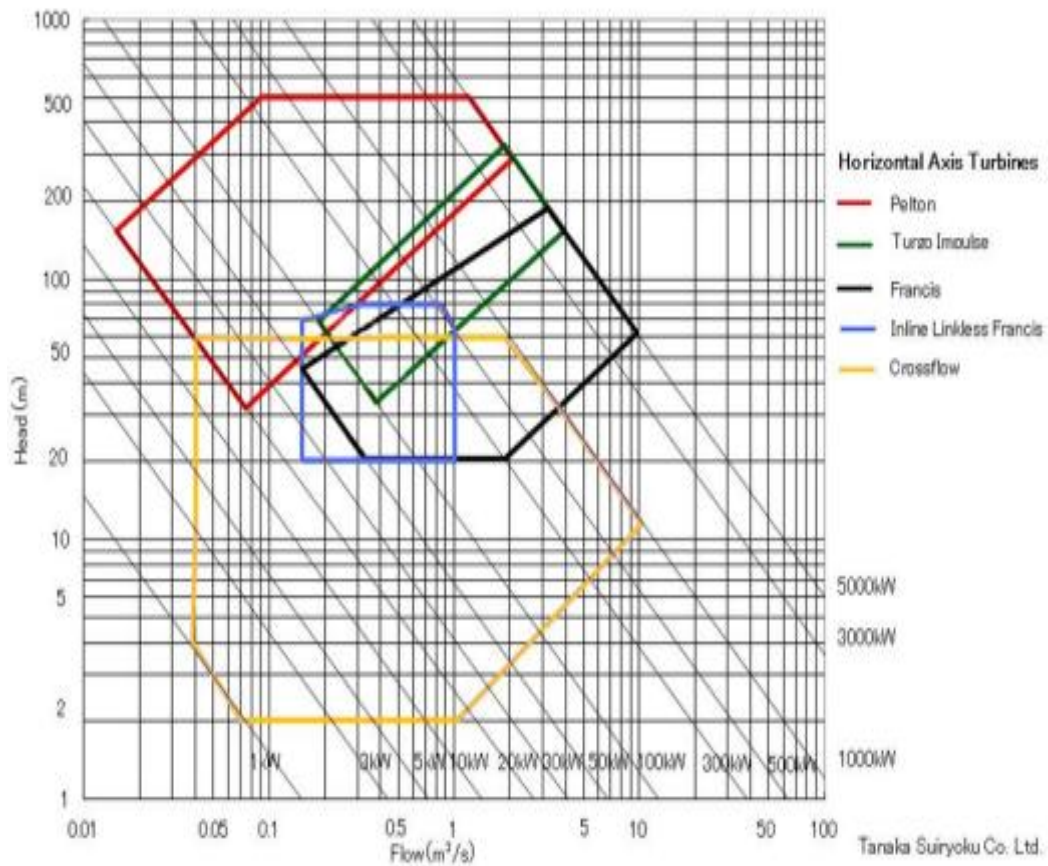
Dalam hal ini pengoperasian turbin air disesuaikan dengan potensi *head* dan debit yang ada yaitu :

- a. *Head* yang rendah yaitu dibawah 1 sampai 70 meter tetapi debit air yang besar, maka *Turbin Kaplan* atau *propeller* cocok digunakan untuk kondisi seperti ini.
- b. *Head* yang sedang antara 1 sampai 200 meter dan debit relatif cukup, maka untuk kondisi seperti ini gunakanlah *Turbin Francis* atau *Cross-Flow*.
- c. *Head* yang tinggi yakni di atas 45 hingga 1000 meter dan debit sedang, maka gunakanlah turbin impuls jenis *Pelton*. (Kudip, 2002)

Di Indonesia, Balitbang telah membuat beberapa turbin jenis seperti yang disebutkan di atas. Berikut ini adalah tabel 2.2 dan gambar 2.8 serta keterangan tentang grafik yang menunjukkan Klasifikasi jenis pembangkit listrik tenaga air:

Tabel 2.2 Klasifikasi jenis pembangkit listrik tenaga air (Sunnyoto, 2008)

Jenis Pembangkit	Kapasitas Keluaran Daya
<i>Large – hydro</i>	Sampai 100 MW
<i>Medium – hydro</i>	15 – 100 MW
<i>Small – hydro</i>	1 – 15 MW
<i>Mini – hydro</i>	100 kW – 1 MW
<i>Micro – hydro</i>	5 kW – 100 kW
<i>Pico – hydro</i>	Sampai 5 kW



Gambar 2.7 Grafik efisiensi jenis turbin berdasarkan *head*, *flow*, dan daya

C.A Mockmore (1949)

G. Perancangan Dimensi Turbin PLTMH

Untuk menentukan dimensi turbin PLTMH sebelumnya perlu kita ketahui rancangan dimensinya dahulu. Tahap-tahapan perancangan dimensi turbinnya adalah sebagai berikut:

Desain *runner* turbin, meliputi:

a. Kecepatan air masuk turbin (C_1)

$$C_1 = C_v \sqrt{2gh} \quad (2.5)$$

Dimana :

C_1 = kecepatan air masuk turbin (m/s)

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

H = tinggi jatuh air

Cv = koefisien kecepatan air pada *nozzle* (0,98)

b. Kecepatan sisi masuk rotor turbin/kecepatan tangensial (U_1)

$$U_1 = Ku_1 \cdot C_1 \cdot \cos \alpha \quad (2.6)$$

Dimana :

U_1 = kecepatan keliling (m/s)

Ku_1 = koefisien kecepatan keliling

α = sudut masuk yang dibentuk oleh kecepatan absolut dan kecepatan tangensial.

c. Diameter *runner* pada sisi masuk (D_1)

$$D_1 = \frac{60 \cdot U_1}{\pi \cdot n} \quad (2.7)$$

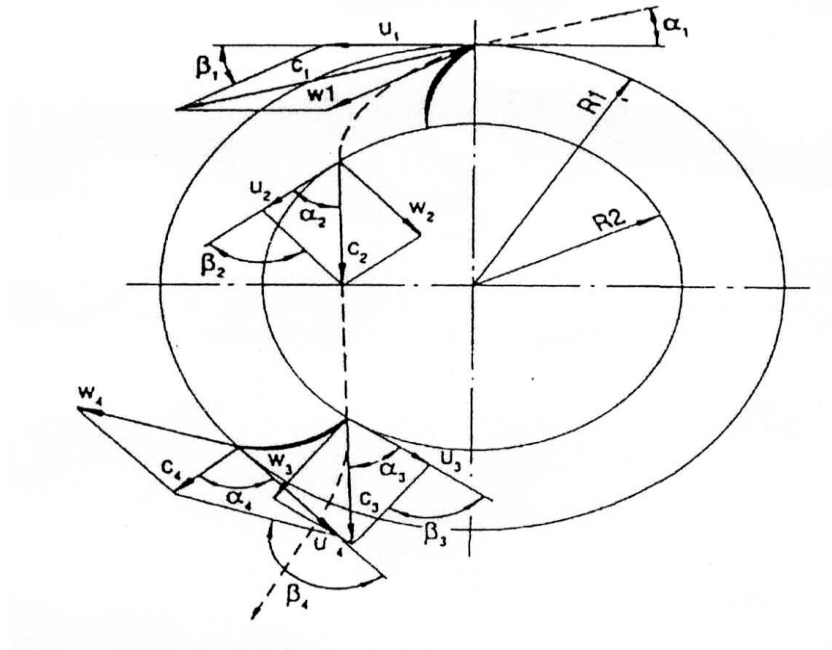
Dimana :

D_1 = diameter runner (m)

n = putaran turbin.

d. Diameter *runner* bagian dalam

$$D_2 = 0,66 \cdot D_1 \quad (2.8)$$



Gambar 2.8 Segitiga kecepatan lintasan air melewati turbin

Keterangan gambar :

1. Parameter saat air masuk sudu pada tingkat I

W_1 = kecepatan relatif air masuk sudu pada tingkat I

C_1 = kecepatan air masuk turbin

β_1 = sudut kecepatan air masuk bagian luar runner

U_1 = kecepatan linier (keliling)

α_1 = sudut masuk yang dibentuk oleh kecepatan absolut dengan kecepatan tangensial.

2. Parameter saat air keluar sudu pada tingkat I

C_2 = kecepatan absolut air keluar sudu tingkat I

W_2 = kecepatan relatif air keluar sudu pada tingkat I

β_2 = sudut kecepatan air masuk bagian dalam runner

U_2 = kecepatan linier saat keluar sudu.

3. Parameter air saat masuk sudu tingkat II (C_3, W_3, α_3, U_3)
4. Parameter air pada saat keluar pada sudu tingkat II (C_4, U_4, β_4, W_4)

a. Desain panjang sudu

Panjang sudu ditentukan menggunakan persamaan (Ismono, 1999) :

$$b = 0,006 \frac{nQ}{kH} \quad (2.9)$$

Dimana :

b = panjang sudu

n = putaran turbin (rpm)

Q = kapasitas aliran (m^3/s)

H = tinggi jatuh (*head*) (m)

K = koefisien tebal semburan air terhadap diameter *runner*

b. Panjang busur (lb)

Langkah menghitung panjang busur adalah (Arter dan Meier, 1990):

Menghitung C :

$$C = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos(\beta_1 + \beta_2)} \quad (2.10)$$

Menghitung ε (Sudianto, 1999):

$$\varepsilon = \text{ArcSin} \left[\frac{R_2 \sin(\beta_1 + \beta_2)}{C} \right] \quad (2.11)$$

Menghitung ξ :

$$\xi = 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2 + \varepsilon) \quad (2.12)$$

Menghitung ϕ :

$$\phi = (\beta_1 + \beta_2) - (180^\circ - 2 \cdot \xi) \quad (2.13)$$

Menghitung d:

$$d = \frac{R_1 \sin \phi}{2 \sin(180^\circ - \xi)} \quad (2.14)$$

Menghitung sudut kelengkapan sudu (δ) :

$$\delta = 180^\circ - 2(\beta_1 + \varepsilon) \quad (2.15)$$

Menghitung jari-jari kelengkungan sudu (rb) :

$$rb = \frac{d}{\cos(\beta_1 + \varepsilon)} \quad (2.16)$$

Menghitung jari-jari kelengkungan jarak bagi (*pitch*) sudu (rp):

$$rp = \sqrt{rb^2 + R_1^2 - 2rb_1 R_1 \cos \beta_1} \quad (2.17)$$

Menghitung panjang Busur (lb)

$$lb = 2 \cdot \pi \cdot rb \cdot \delta / 360^\circ \quad (2.18)$$

c. Jumlah sudu

Jumlah sudu dapat diperoleh dengan persamaan (Mockmore, 1949) :

$$Z = \frac{\pi \cdot D_1}{t} \quad (2.19)$$

Dimana :

t = jarak antara sudu luar

$$t = S_2 / \sin \beta_1$$

$$S_2 = k \cdot D_1 \quad \{k = \text{tetapan } (0,075 - 0,10)\}$$

Ketebalan sudu (S_1)

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{t \cdot Z} \quad (2.20)$$

P = daya keluaran

$$P = Q \cdot g \cdot H \cdot \eta_t$$

Lalu untuk menghitung diameter poros dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{5,1}{\tau_a} \cdot K_t \cdot C_b \cdot T} \quad (2.23)$$

dimana :

τ_a = tegangan yang diizinkan (kg/mm^2)

σ_b = kekuatan tarik (kg/mm^2)

$$\tau_a = \frac{\sigma_b}{s f_1 \cdot s f_2}$$

K_t = faktor koreksi untuk puntiran

C_b = faktor lenturan

Poros yang aman untuk digunakan dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut:

$$\tau_k = \frac{5,1 T}{d_s^3} \quad (2.24)$$

dimana :

$$\tau_a > \tau_k$$

τ_a = tegangan yang diizinkan (kg/mm^2)

τ_k = tegangan geser yang timbul (kg/mm^2)

f. Pasak

Perancangan pasak dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut (Sularso, 1987):

$$F = \frac{T}{d/2} \quad (2.25)$$

dimana:

F = gaya yang bekerja pada pasak

d = diameter poros

Pasak yang aman untuk digunakan dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut:

$$\tau_k = \frac{F}{b \cdot l} \quad (2.26)$$

dimana :

b = lebar pasak

l = panjang pasak

$\tau_a > \tau_k$

τ_a = tegangan yang diizinkan (kg/mm²)

τ_k = tegangan geser yang timbul (kg/mm²)

$$\tau_a = \frac{\sigma_b}{sf_1 \cdot sf_2}$$