

---

# 1. TURBIN AIR

---

Dalam suatu sistem PLTA, turbin air merupakan salah satu peralatan utama selain generator. Turbin air adalah alat untuk mengubah energi air menjadi energi puntir. Energi puntir ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator.

---

## 1.1 Jenis Turbin Air

---

Turbin air dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa cara, namun yang paling utama adalah klasifikasi turbin air berdasarkan cara turbin air tersebut merubah energi air menjadi energi puntir. Berdasarkan klasifikasi ini, maka turbin air dibagi menjadi dua yaitu

1. Turbin impuls dan
2. Turbin reaksi.

### 1.1.1 Turbin Impuls

---

Yang dimaksud dengan turbin impuls adalah turbin air yang cara bekerjanya dengan merubah seluruh energi air (yang terdiri dari energi potensial + tekanan + kecepatan) yang tersedia menjadi energi kinetik untuk memutar turbin, sehingga menghasilkan energi puntir. Contoh: turbin Pelton.

## 1.1.2 Turbin Reaksi

---

Yang dimaksud dengan turbin reaksi adalah turbin air yang cara bekerjanya dengan merubah seluruh energi air yang tersedia menjadi energi puntir. Turbin air reaksi dibagi menjadi dua jenis yaitu:

1. Francis, contoh: turbin Francis dan
2. Propeller:
  - a. Sudu tetap (fixed blade), turbin jenis ini merupakan turbin generasi pertama dari jenis ini. Karena sudu tidak dapat diatur, maka efisiensinya berkurang jika digunakan pada kisaran debit yang lebar. Oleh karena itu dikembangkan jenis dengan sudu yang dapat diatur agar efisiensi tetap tinggi walaupun kisaran debitnya lebar.
  - b. Sudu dapat diatur (adjustable blade), contoh Kaplan, Nagler, Bulb, Moody.

## 1.2 Karakteristik Turbin

---

---

Untuk dua turbin atau lebih yang mempunyai dimensi yang berlainan disebut homologous jika kedua turbin atau lebih tersebut sebangun geometri dan mempunyai karakteristik sama. Karakteristik suatu turbin dinyatakan secara umum oleh enam buah konstanta yaitu

1. Rasio Kecepatan ( $\phi$ )
2. Kecepatan Satuan ( $N_u$ )
3. Debit Satuan ( $Q_u$ )
4. Daya Satuan ( $P_u$ )
5. Kecepatan Spesifik ( $N_s$ )
6. Diameter Spesifik ( $D_s$ )

### 1.2.1 Rasio Kecepatan ( $\phi$ )

---

Rasio Kecepatan ( $\phi$ ) adalah perbandingan antara kecepatan keliling linier turbin pada ujung diameter nominalnya dibagi dengan kecepatan teoritis air melalui curat dengan tinggi terjun sama dengan tinggi terjun ( $H_{netto}$ ) yang bekerja pada turbin.

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \frac{V_{\text{linier}}}{\sqrt{2gH}} \\ V_{\text{linier}} &= \frac{N \pi D}{60} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \phi = \frac{ND}{84.6 \sqrt{H}} \quad (1.1)$$

dengan  $N$  adalah putaran turbin rpm (rotasi per menit),  $D$  adalah diameter karakteristik turbin (m), umumnya digunakan diameter nominal,  $H$  adalah tinggi terjun netto/efektif (m).

### 1.2.2 Kecepatan Satuan ( $N_U$ )

Kecepatan Satuan ( $N_U$ ) adalah kecepatan putar turbin yang mempunyai diameter ( $D$ ) satu satuan panjang dan bekerja pada tinggi terjun ( $H_{\text{netto}}$ ) satu satuan panjang.

Dari Pers.(1.1) diperoleh korelasi:

$$N = 84.6 \phi \frac{\sqrt{H}}{D} \quad (1.2)$$

dengan memasukkan nilai  $D = 1$  m dan  $H = 1$  m, maka Pers.(1.2) menjadi

$$N_U = 84.6 \phi \quad (1.3)$$

Akhirnya Pers.(1.2) dapat ditulis sebagai

$$\boxed{N_U = \frac{ND}{\sqrt{H}}} \quad (1.4)$$

### 1.2.3 Debit Satuan ( $Q_U$ )

Debit yang masuk turbin secara teoretis dapat diandaikan sebagai debit yang melalui suatu curat dengan tinggi terjun sama dengan tinggi terjun ( $H_{\text{netto}}$ ) yang bekerja pada turbin. Oleh karena itu debit yang melalui turbin dapat dinyatakan sebagai

$$\begin{aligned} Q &= C_d \frac{1}{4} \pi D^2 \sqrt{2gH} \\ &= C D^2 \sqrt{H} \end{aligned} \quad (1.5)$$

dengan  $C_d$  adalah koefisien debit.

Debit Satuan ( $Q_U$ ) adalah debit turbin yang mempunyai diameter ( $D$ ) satu satuan panjang dan bekerja pada tinggi terjun ( $H_{netto}$ ) satu satuan panjang.

$$Q_U = C_d \frac{1}{4} \pi \sqrt{2g} \quad (1.6)$$

Akhirnya Pers.(1.5) dapat ditulis sebagai

$$Q_U = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad (1.7)$$

### 1.2.4 Daya Satuan ( $P_U$ )

Daya ( $P$ ) yang dihasilkan turbin dapat dinyatakan sebagai

$$P = \eta Q H \gamma = \eta \underbrace{Q_U D^2 \sqrt{H}}_Q H \gamma \quad (1.8)$$

$$P = \underbrace{\eta \gamma Q_U}_{P_U} D^2 H^{3/2}$$

dengan  $\eta$  adalah efisiensi turbin,  $\gamma$  adalah berat jenis air.

Daya Satuan ( $P_U$ ) adalah daya turbin yang mempunyai diameter ( $D$ ) satu satuan panjang dan bekerja pada tinggi terjun ( $H_{netto}$ ) satu satuan panjang.

Akhirnya Pers.(1.8) dapat ditulis sebagai

$$P_U = \frac{P}{D^2 H^{3/2}} \quad (1.9)$$

### 1.2.5 Kecepatan Spesifik ( $N_S$ )

Eliminasi diameter ( $D$ ) dari Pers.(1.4) dan Pers.(1.9) menghasilkan korelasi:

$$N = \underbrace{\sqrt{P_U} N_U}_{N_S} \frac{H^{5/4}}{\sqrt{P}}$$

atau

$$N_S = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (1.10)$$

Kecepatan Spesifik ( $N_S$ ) adalah kecepatan putar turbin yang menghasilkan daya sebesar satu satuan daya pada tinggi terjun ( $H_{netto}$ ) satu satuan panjang.

Kecepatan Spesifik ( $N_S$ ) dapat dinyatakan dalam sistim metrik maupun sistim Inggris, korelasi dari kedua sistim tersebut dinyatakan dalam

$$N_S (\text{metrik}) = N_S (\text{Inggris}) \times 4.42 \quad (1.11a)$$

Catatan: Satuan daya yang digunakan dalam rumus di atas adalah daya kuda (DK) atau horse-power (HP).

### 1.2.6 Diameter Spesifik ( $D_S$ )

Dari Pers.(1.9) diperoleh korelasi:

$$D = \frac{1}{\underbrace{\sqrt{P_U}}_{D_S}} \frac{\sqrt{P}}{H^{3/4}} \quad (1.12)$$

Diameter Spesifik ( $D_S$ ) adalah diameter turbin yang menghasilkan daya sebesar satu satuan daya pada tinggi terjun ( $H_{netto}$ ) satu satuan panjang.

Akhirnya Pers.(1.12) dapat ditulis sebagai

$$D_S = \frac{D H^{3/4}}{\sqrt{P}} \quad (1.13)$$

Rumus empiris<sup>1</sup> untuk menghitung diameter spesifik dari diameter debit (discharge diameter,  $D_3$ ) untuk turbin reaksi adalah sebagai berikut:

$$\text{Turbin Francis: } D_{3s} = \frac{567.85}{N_s^{0.37}} \text{ (cm)} \quad (1.14)$$

$$\text{Turbin propeller: } D_{3s} = \frac{475.72}{N_s^{0.34}} \text{ (cm)} \quad (1.15)$$

Pada turbin reaksi, jika diameter spesifiknya telah dihitung dengan Pers.(1.14) atau (1.15) , maka diameter debit dapat dihitung dari Pers.(1.12). Diameter debit sangat berguna untuk penentuan dimensi pipa spiral dan pipa isap.

### 1.3 Seleksi Awal Jenis Turbin

Seleksi awal dari jenis turbin yang cocok untuk suatu keperluan paling tepat dilakukan dengan menggunakan Kecepatan Spesifik ( $N_s$ ). Dalam Tabel 1.1 disajikan nilai Kecepatan Spesifik ( $N_s$ ) untuk berbagai jenis turbin. Tabel 1.1 dapat digunakan sebagai panduan awal dalam pemilihan jenis turbin yang tepat untuk nilai  $N_s$  tertentu. Nilai  $N_s$  yang tercantum dalam Tabel 1.1 bukan nilai yang eksak.

Untuk setiap jenis turbin terdapat suatu nilai kisaran tinggi terjun dan kecepatan spesifik yang sesuai. Korelasi empiris antara tinggi terjun ( $H$ ) dan kecepatan spesifik ( $N_s$ ) disajikan di bawah ini.

Untuk turbin Francis, Moody<sup>2</sup> memperoleh korelasi sebagai berikut:

$$N_s = \frac{6803}{H + 9.75} + 84 \quad (1.16)$$

sedangkan untuk turbin propeller, Moody memperoleh korelasi sebagai berikut:

---

<sup>1</sup> Dikutip dari buku Hydro Power Engineering, A Textbook for Civil Engineers, James J. Doland, D.Sc., The Ronald Press company, New York, 1984, hal. 77.

<sup>2</sup> Dikutip dari buku Hydroelectric Handbook, William P. Creager and Joel D. Justin, Secod Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950, hal. 826.

$$N_S = \frac{9431}{H + 9.75} + 155 \quad (1.17)$$

Untuk turbin Francis, White<sup>3</sup> menyarankan korelasi sebagai berikut:

$$N_S = \frac{1542}{\sqrt{H}} \quad (1.18)$$

dengan  $H$  adalah tinggi terjun netto (m) dan  $N_S$  adalah kecepatan spesifik metrik.

Tabel 1.1. Jenis Turbin Air dan Kisaran Kecepatan Spesifiknya ( $N_S$ )

Jenis Turbin		$N_S$ (metrik)
1. Turbin Impuls	a. Satu jet (turbin Pelton)	4–30
	b. Banyak jet (turbin Doble)	30–70
2. Turbin Reaksi	a. Francis	
	$N_S$ rendah	50–125
	$N_S$ normal	125–200
	$N_S$ tinggi	200–350
	$N_S$ express	350–500
	b. Propeller	
	Sudu tetap (turbin Nagler)	400–800
Sudu dapat diatur (turbin Kaplan)	500–1000	

## 1.4 Evolusi Turbin

Dalam perkembangannya turbin air mengalami perubahan sebagai berikut:

1. Arah arus air lewat sudu berubah dari tangensial (turbin Pelton) menjadi radial (turbin Francis), dan akhirnya axial (turbin propeller).
2. Cincin bawah (turbin Francis) makin lama menghilang (turbin propeller).

<sup>3</sup> Dikutip dari buku Water Power Engineering, H.K. Barrows, S.B., Third Edition, Fourth Impression, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York and London, 1943, hal. 244.

3. Jumlah sudu makin berkurang (turbin Pelton: banyak sudu  $\Rightarrow$  turbin Francis  $\Rightarrow$  turbin propeller: minimum 2 s/d 3 sudu).

## 1.5 Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin tidak tetap nilainya, tergantung dari keadaan beban dan jenis turbinnya. Kinerja dari suatu turbin dapat dinyatakan dalam beberapa keadaan: tinggi terjun maksimum, tinggi terjun minimum, tinggi terjun normal, dan tinggi terjun rancangan. Pada tinggi terjun rancangan turbin akan memberikan kecepatan terbaiknya sehingga efisiensinya mencapai maksimum. Dalam Tabel 1.2 disajikan efisiensi turbin untuk berbagai kondisi sebagai gambaran mengenai kisaran nilai efisiensi terhadap beban dan jenis turbin.

Tabel 1.2. Efisiensi Turbin Untuk Berbagai Kondisi Beban<sup>4</sup>

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

<sup>4</sup> Dikutip dari buku *Hydroelectric Handbook*, William P. Creager and Joel D. Justin, Secod Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1950, hal. 832.



## 1.5.1 Efisiensi Turbin Homologous

Kadang-kadang dalam merancang turbin diperlukan data efisiensi dari turbin yang sejenis maupun dari studi model. Untuk dapat membandingkan efisiensi antar turbin, maka turbin tersebut harus homologous. Rumus efisiensi untuk turbin homologous merupakan rumus empiris dan hanya berlaku untuk efisiensi maksimum turbin.

Moody menyarankan rumus efisiensi untuk turbin Francis:

$$\text{di U.S.A.}^5 \quad \left( \frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_2} \right)^4 = \frac{D_2}{D_1} \quad (1.19)$$

$$\text{di Eropa}^6 \quad \left( \frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_2} \right)^5 = \frac{D_2}{D_1} \quad (1.20)$$

dengan  $\eta$  adalah efisiensi dan  $D$  adalah diameter turbin.

Hutton<sup>7</sup> menyarankan rumus efisiensi untuk turbin propeller dan Kaplan:

$$\frac{1 - \eta_1}{1 - \eta_2} = 0.3 + 0.7 \left( \frac{Re_2}{Re_1} \right)^{0.125} \quad \text{dengan } Re = \frac{D \sqrt{H}}{v} \quad (1.21)$$

## 1.6 Korelasi Antar Turbin

Untuk mendapatkan korelasi beberapa turbin, maka setiap turbin tersebut harus homologous satu sama lain. Untuk turbin yang homologous satu sama lain, maka nilai setiap konstanta turbin yang dijelaskan di atas untuk masing-masing turbin adalah sama.

Untuk memudahkan pembahasan selanjutnya, didefinisikan rasio antara variabel pada Turbin 1 dan Turbin 2 yang homologous sebagai berikut:

---

<sup>5</sup>Lewis F. Moody, Trans. A.S.C.E., Vol. 89 (1926), p. 628, dalam Hydro Power Engineering, A Textbook for Civil Engineers, James J. Doland, D.Sc., The Ronald Press company, New York, 1984, hal. 27.

<sup>6</sup> Dikutip dari buku Water Power Development, Volume One, Low-Head Power Plants, Emil Mosonyi, Akadémiai Kiadó, Budapest, hal. 634.

<sup>7</sup> Dikutip dari buku Water Power Development, Volume One, Low-Head Power Plants, Emil Mosonyi, Akadémiai Kiadó, Budapest, hal. 633.

$$(Variabel)_r = \frac{(Variabel)_1}{(Variabel)_2} \quad (1.22)$$

Dari Pers.(1.4) s/d (1.13) diperoleh korelasi antara dua buah turbin homologous sebagai berikut:

$$(N_U)_r = \frac{\left(\frac{ND}{\sqrt{H}}\right)_1}{\left(\frac{ND}{\sqrt{H}}\right)_2} \text{ atau } 1 = \frac{\left(\frac{ND}{\sqrt{H}}\right)_1}{\left(\frac{ND}{\sqrt{H}}\right)_2}$$

sehingga 
$$\frac{H_1}{(N_1 D_1)^2} = \frac{H_2}{(N_2 D_2)^2} \quad (1.23)$$

Dengan cara serupa diperoleh korelasi yang lain sebagai berikut:

$$\frac{Q_1}{N_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{N_2 D_2^3} \quad (1.24)$$

$$\frac{P_1}{\eta_1 N_1^3 D_1^5} = \frac{P_2}{\eta_2 N_2^3 D_2^5} \quad (1.25)$$

nilai  $\eta$  pada Pers.(1.25) dapat dihitung dengan Pers.(1.19) s/d (1.21).

## 1.7 Kavitas

---

Pada turbin reaksi, letak turbin harus diperhatikan agar tidak terjadi bahaya kavitasi yang terjadi akibat adanya tekanan absolut yang lebih kecil dari tekanan uap air. Kavitasi dapat menyebabkan sudu-sudu turbin menjadi berlubang-lubang kecil, sehingga mengurangi efisiensi turbin yang akhirnya dapat pula merusak sudu turbin.

Analisis kavitasi pada turbin reaksi akan dijelaskan dengan pertolongan Gambar 1.1. Hukum Bernoulli dikerjakan pada Titik 1 dan Titik 2 sebagai berikut:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1.26)$$

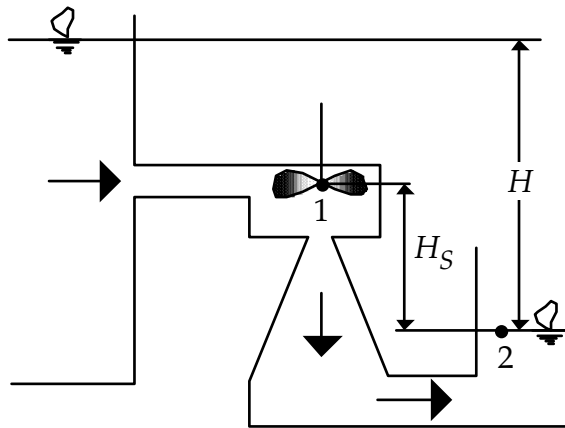
$$H_S + H_1 + \frac{V_1^2}{2g} = 0 + H_{atm} + 0$$

Tinggi kecepatan pada Titik 1 berbanding lurus dengan tinggi terjun efektif  $H$ . Agar tidak terjadi kavitasi maka tinggi tekanan pada Titik 1 harus lebih besar atau sama dengan tinggi tekanan kavitasi. Oleh karena itu, Pers.(1.26) dapat ditulis sebagai:

$$\sigma = \frac{H_{atm} - H_v - H_S}{H} \quad (1.27)$$

$$\sigma = \frac{H_b - H_S}{H} \text{ dengan } H_b = H_{atm} - H_v$$

dengan  $H_S$  adalah tinggi tekanan isap,  $H_v$  adalah tinggi tekanan kavitasi,  $H_{atm}$  adalah tinggi tekanan udara luar,  $\sigma$  adalah sigma turbin atau koefisien kavitasi, dan  $H$  adalah tinggi terjun netto/efektif.



Gambar 1.1. Skema Turbin Reaksi Untuk Analisis Kavitasi

### 1.7.1 Letak Sumbu Distributor Turbin Aman Kavitasi

Jika turbin diletakkan lebih tinggi dari tinggi tekanan isap, maka kavitasi akan terjadi, sehingga letak turbin harus selalu dibawah tinggi tekanan isap ( $H_S$ ).

Tinggi tekanan isap ( $H_s$ ) untuk masing-masing jenis turbin adalah berlainan. Untuk turbin Francis,  $H_s$  diukur dari paras muka air belakang sampai dengan dasar dari cincin bawah. Untuk turbin propeller,  $H_s$  diukur dari paras muka air belakang sampai dengan pusat sudu.

Sebagai langkah awal dalam penentuan elevasi sumbu distributor untuk turbin dengan sumbu vertikal, dapat dilakukan langkah hitungan sebagai berikut<sup>8</sup>:

1. Tentukan kecepatan spesifik dari turbin.
2. Tentukan  $H_b$  berdasarkan Gambar 1.2, suhu air dan elevasi PLTA.
3. Hitung  $H_s$ . Jika ternyata nilai  $H_s$  negatif, berarti dasar cincin bawah turbin Francis atau pusat sudu turbin propeller berada dibawah paras muka air belakang.
4. Prakirakan jarak antara sumbu distributor sampai dasar cincin bawah turbin Francis, atau pusat sudu turbin propeller ( $=A$ ). Rumus empirik yang dapat digunakan untuk keperluan itu adalah

$$\text{Turbin Francis: } \frac{A}{D_3} = \frac{N_s^{0.34}}{17.7} \quad (1.28)$$

$$\text{Turbin Propeller: } \frac{A}{D_3} = 0.41 \quad (1.29)$$

5. Paras muka air belakang diprakirakan berdasarkan kondisi operasi turbin yang mengakibatkan paras muka air belakang minimum.
6. Elevasi sumbu distributor ditentukan berdasarkan paras muka air belakang ditambah  $A + H_s$ .

---

<sup>8</sup>Dikutip dari buku Hydro Power Engineering, A Textbook for Civil Engineers, James J. Doland, D.Sc., The Ronald Press company, New York, 1984, hal. 70-72.

Gambar 1.2. Penentuan Elevasi Turbin Aman Kavitasi<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Dikutip dari buku Hydro Power Engineering, A Textbook for Civil Engineers, James J. Doland, D.Sc., The Ronald Press company, New York, 1984, hal. 71.

Prakiraan nilai  $H_b$  harus seteliti mungkin untuk daerah pegunungan yang tinggi (PLTA dengan tinggi terjun besar), sedangkan untuk daerah dataran rendah dapat digunakan nilai  $H_b = 10$  m.

Nilai  $H_b$  menurun dengan naiknya elevasi tempat dengan laju rerata 0.11 m tinggi air untuk setiap 100 m kenaikan elevasi tempat. Pada paras muka air laut rerata  $H_b = 10.3$  m. Dengan andaian bahwa fluktuasi tekanan atmosfer berkisar  $\pm 5\%$ , maka untuk keperluan praktis dapat digunakan rumus empirik<sup>10</sup> pengganti Langkah 2 di atas sebagai berikut:

$$H_b = 0.95 \left\{ 10.3 - 0.11 \text{ Integer} \left( \frac{E}{100} \right) \right\} \text{ meter} \quad (1.30)$$

dengan  $E$  adalah elevasi tempat terhadap paras muka air laut rerata.

## 1.8 Definisi Diameter Turbin

Dalam pembahasan turbin terdapat beberapa macam istilah diameter yang digunakan.

### 1. Turbin Pelton.

$D_1$  adalah diameter lingkaran tempat kedudukan pusat berat sudu-sudu (pitch circle).

### 2. Turbin Francis.

$D_1$  adalah diameter kincir ditengah-tengah distributor (diameter nominal).

$D_2$  adalah diameter minimum yang diukur disebelah dalam cincin bawah.

$D_3$  adalah diameter sebelah dalam cincin debit (discharge ring).

### 3. Turbin Propeller.

$D_1$  adalah diameter kincir yang diukur dari ujung sudu ke ujung sudu.

$D_2$  adalah diameter kincir yang melalui titik tengah sudu-sudu.

$D_3$  adalah diameter sebelah dalam cincin debit (discharge ring).

---

<sup>10</sup> Dikutip dari buku Water Power Development, Volume One, Low-Head Power Plants, Emil Mosonyi, Akadémiai Kiadó, Budapest, hal. 655.