

Perancangan Turbin Francis untuk Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro di Lhok Sandeng Kabupaten Pidie Jaya

Azwinur¹, Hamdani², Ahmad Syuhada²

¹⁾ Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111
email: lcbarat.azwir@gmail.com

²⁾ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111

Abstract

The increase of population, followed by the increasing growth of the industry led to high demand of electricity. Many different ways have been done to find and use natural potential as electrical energy that can be used. The potential energy of water is one of the energy that can be converted into electrical energy maximally. One of still unused water potential energies is the water of Krueng Meureudu in Pidie Jaya. The river location is in Lhok Sandeng village, Meurah Dua sub district, Pidie Jaya. The width of the river ranges from 30 to 50 meter with the debit of about $10\div 15\text{ m}^3/\text{s}$. This can be used to generate electricity using Francis type water turbines to meet the energy requirements of the surrounding population. The first step in designing the turbine is to determine the turbine type based on the value of specific rotation (Ns) obtained from the head (H) and debit data (Q). Then, the design of main components, which are runner, shaft, spiral casing, guide vane and draft tube. Thus, based on the calculation, the dimensions and designs of the main components of the Francis turbine are obtained.

Keywords: minihidro power, runner, spiral casing, guide vane, draft tube

1. Pendahuluan

Bertambahnya jumlah penduduk yang diikuti dengan meningkatnya pertumbuhan industri menyebabkan tingginya permintaan kebutuhan listrik. maka berbagai cara dilakukan untuk mencari dan menggunakan potensi alam sebagai energi listrik yang dapat digunakan, salah satunya dengan cara memanfaatkan sumber daya alam yang ada disekitar daerah tersebut seperti aliran sungai ataupun air terjun yang dibuat sebagai sumber pembangkit tenaga listrik dari potensi alam (air) tersebut. Salah satu contohnya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM).

Turbin francis adalah salah satu jenis turbin air (hidraulik) yang paling sering digunakan sampai sekarang pada PLTM, turbin ini beroperasi dalam head range antara 10 sampai 350 meter dan fungsi utamanya adalah dalam memproduksi tenaga listrik dengan efisiensi mencapai 90%. Turbin ini termasuk turbin reaksi aliran yang mengkombinasikan konsep aliran radial dan axial[1].

Tujuan dari penelitian ini adalah Pemilihan jenis turbin air yang sesuai berdasarkan data head (H) dan kapasitas air (Q) yang diperoleh dilapangan dan merancang komponen utama turbin air tipe Francis yang dapat dioperasikan sesuai kondisi lapangan saluran Krueng Meureudu di Lhok Sandeng Kabupaten Pidie Jaya.

2. Kajian Pustaka

Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) adalah suatu pembangkit listrik skala kecil yang mengubah energi potensial air menjadi kerja mekanis, memutar turbin dan generator untuk menghasilkan daya listrik yang skala kecil. Komponen Pokok Minihidro adalah Dam/Bendungan Pengalih dan *Intake*, Bak Pengendap, Saluran Pembawa, Bak Penenang, Pipa Pesat dan Rumah Pembangkit.

Klasifikasi turbin air berdasarkan prinsip kerjanya adalah[1]:

1. Turbin implus (cross-flow, pelton & turgo). Turbin jenis ini disebut turbin tanpa tekanan, karena perubahan tekanan hanya terjadi pada *nozzle* saja dan sudu gerakanya beroperasi pada tekanan atmosfer.
2. Turbin reaksi (francis, Kaplan, propeller). Turbin reaksi memanfaatkan perubahan tekanan dimana perubahan tekanan terjadi pada *guide vane* dan *runner*.

Pemilihan jenis turbin dapat ditentukan berdasarkan kelebihan dan kekurangan dari jenis-jenis turbin. Pada tahap awal, pemilihan jenis turbin dapat diperhitungkan dengan mempertimbangkan parameter-parameter khusus yang mempengaruhi factor operasi turbin, yaitu :

1. Faktor tinggi jatuhan air efektif (*Net Head*) dan debit yang akan dimanfaatkan untuk operasi turbin.
2. Faktor daya (*Power*) yang diinginkan berkaitan dengan head dan debit yang tersedia.
3. Kecepatan (Putaran) turbin yang akan ditransmisikan ke generator.

Ketiga faktor di atas seringkali diekspresikan sebagai "kecepatan spesifik, N_s ". Kecepatan spesifik adalah kecepatan turbin untuk menghasilkan satu satuan daya dengan tinggi jatuh air (head) pada efisiensi maksimum, dengan persamaan [2]:

$$N_s = \frac{n \times \sqrt{P}}{(H)^{5/4}} \quad (1)$$

2.1. Turbin Francis.

Turbin francis petama kali dikembangkan oleh James B. Francis, pada tahun 1848 dia mampu membuktikan desainnya untuk menciptakan turbin dengan efisiensi sampai dengan 90%, dia mengaplikasikan ilmu sains dengan metode pengujian untuk menghasilkan turbin dengan efisiensi yang cukup besar, kemudian ia juga membuktikannya dengan perhitungan matematika dan grafik[3].

Ada beberapa komponen utama turbin francis, yaitu :

2.1.1. Sudu gerak (*runner*)

Runner adalah bagian yang berbentuk baling-baling atau sudu yang dapat bergerak akibat adanya tumbukan air pada dinding sudu. Bagian ini terhubung dengan poros yang kemudian akan menghasilkan energi mekanik. Ada beberapa tahapan untuk menghitung *runner* yaitu:

- a) Diameter Poros (D_{sh})
Perhitungan diameter poros (D_{sh}) dapat ditentukan dengan persamaan [4]:

$$D_{sh} = \left[\frac{5,1}{\tau_a} \times K_t \times C_b \times T \right]^{1/3} \quad (2)$$

- b) Diameter keluaran roda turbin (D_s)
Untuk menentukan nilai dari diameter keluaramaka menggunakan persamaan [4]:

$$D_s = \sqrt{\frac{Q}{Q_1 \times \sqrt{H}}} \quad (3)$$

- c) Lebar roda turbin (B).

Untuk menentukan lebar dari roda turbin maka persamaan yang digunakan [2]:

$$B = B / D_1 \times D_1 \quad (4)$$

Dimana nilai B/D_1 didapat dari Grafik B/D_1 Terhadap N_s [4].

- d) Meredional Velocity (C_m)
Kecepatan meridional didapatkan dengan persamaan [5]:

$$C_{m1/2} = K_{Cm1/2} \cdot \sqrt{2gH} \quad (5)$$

Nilai K_{cm} diperoleh dari grafik K_{Cm1} dan K_{Cm2} terhadap N_s [5].

- e) Jumlah Sudu (Z)
Jumlah sudu [5] dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

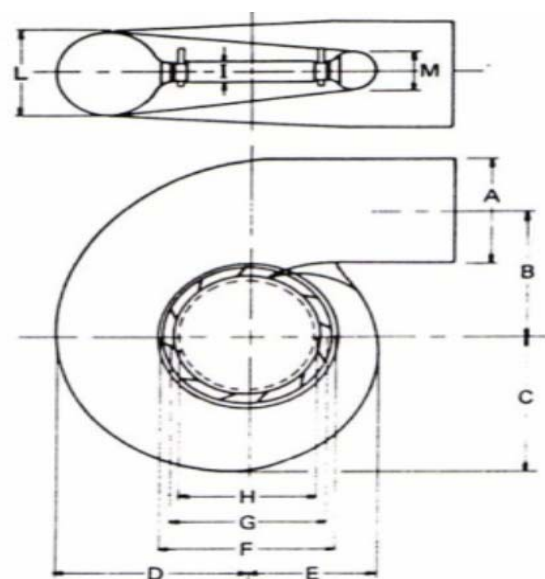
$$Z = 13 \times \frac{r_m}{e} \times \sin\left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{2}\right) \quad (6)$$

2.1.2. Poros utama

Bagian ini bisa dibuat dalam dua bagian utama yaitu bagian atas generator shaft dan bagian bawah turbin shaft yang dikopling dengan kopling tetap.

2.1.3. Scroll Casing/Spiral Casing (*Rumah Siput*).

Rumah spiral (scroll-casing) yang menerima air dari pipa pesat danmengarahkan aliran air ke turbin. Fungsi rumah spiral adalahmembagi rata air yang diterima dari pipa pesat sekeliling turbin.



Gambar 1. Dimensi Utama Rumah Turbin Francis [2].

Metode empirik digunakan untuk merancang rumah turbin berdasarkan dari penelitian yang telah dilakukan *deSiervo* dan *deLeva* [6]. Dimensi-dimensi utama rumah turbin yang akan dihitung adalah seperti gambar 1.

Untuk nilai putaran spesifik (N_s) dilakukan perhitungan ulang dengan daya (N) dalam KW menggunakan persamaan:

$$N_s = \frac{n \times \sqrt{N}}{(H)^{5/4}} \quad (7)$$

Sehingga dimensi rumah turbin [7] seperti pada gambar 1 dapat dihitung dengan persamaan-persamaan seperti berikut [5]:

$$\frac{A}{D_s} = 1,2 - \frac{19,5}{N_s} \quad (8)$$

$$\frac{B}{D_s} = 1,1 + \frac{54,8}{N_s} \quad (9)$$

$$\frac{C}{D_s} = 1,32 + \frac{49,25}{N_s} \quad (10)$$

$$\frac{D}{D_s} = 1,5 + \frac{48,8}{N_s} \quad (11)$$

$$\frac{E}{D_s} = 0,98 + \frac{63,6}{N_s} \quad (12)$$

$$\frac{F}{D_s} = 1 + \frac{131,4}{N_s} \quad (13)$$

$$\frac{G}{D_s} = 0,89 + \frac{96,5}{N_s} \quad (14)$$

$$\frac{I}{D_s} = 0,1 + 0,00065 N_s \quad (15)$$

$$\frac{L}{D_s} = 0,88 + 0,00049 N_s \quad (16)$$

$$\frac{M}{D_s} = 0,6 + 0,000015 N_s \quad (17)$$

2.1.4. Sudu pengarah (guide vane)

Bagian ini berfungsi sebagai pintu masuk air dari rumah spiral menuju *runner blade*, dan juga berfungsi sebagai distributor agar air disekeliling *runner* punya debit yang sama rata, dan sebagai pengamanan turbin pada saat terjadi gangguan.

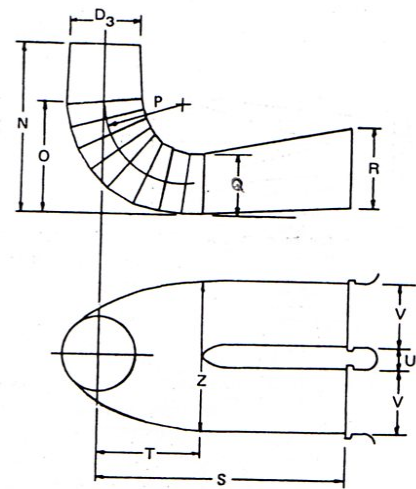
Dalam perancangan Sudu Pengarah kita membutuhkan salah satu komponen dimensi utama dari rumah turbin yaitu diameter *inlet ring guide vane* (G). Maka dapat dihitung jumlah *Guide Blade* dengan persamaan [4]:

$$Z_1 = \frac{1}{4} \sqrt{D'} + (4 \div 6) \quad (18)$$

1. Draft Tube

Draft tube adalah komponen terakhir dari laluan air pada *hydropower plant* dan sangat penting untuk mengarahkan air keluar dari roda turbin menuju *tailrace* dimana air akan dikumpulkan di *receiving body of water*.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan *deSiervo* dan *deLeva* [6] maka dihasilkan rumus empirik dengan dimensi utama yang dihitung dari *draft tube* seperti gambar berikut:



Gambar 2. Dimensi Utama Draft Tube Turbin Francis [8].

Dimensi utama dari *draft tube* sangat dipengaruhi oleh putaran spesifik (N_s) dan diameter *outlet* (D_s). Sehingga dimensi *draft tube* sesuai dengan gambar 2 dapat dihitung dengan persamaan [8]:

$$\frac{N}{D_s} = 1,54 + \frac{203,3}{N_s} \quad (19)$$

$$\frac{O}{D_s} = 0,83 + \frac{140,7}{N_s} \quad (20)$$

$$\frac{P}{D_s} = 1,37 - 0,00056N_s \quad (21)$$

$$\frac{Q}{D_s} = 0,58 + \frac{22,6}{N_s} \quad (22)$$

$$\frac{R}{D_s} = 1,6 - \frac{0,0013}{N_s} \quad (23)$$

$$\frac{S}{D_s} = \frac{N_s}{-9,28 + 0,25N_s} \quad (24)$$

$$\frac{T}{D_s} = 1,5 + 0,00019N_s \quad (25)$$

$$\frac{U}{D_s} = 0,51 - 0,0007N_s \quad (26)$$

$$\frac{V}{D_s} = 1,10 + \frac{53,7}{N_s} \quad (27)$$

$$\frac{Z}{D_s} = 2,63 + \frac{33,8}{N_s} \quad (28)$$

Dari dimensi utama yang dihitung melalui persamaan di atas maka dapat dilakukan penggambaran dari *draft tube* Turbin Francis.

3. Metode Penelitian

Langkah awal dalam melakukan penelitian adalah

- Melakukan survey lokasi untuk mendapatkan data potensi seperti *Head*, debit air sungai dan daya listrik yang direncanakan. Berdasarkan data tersebut maka dapat ditentukan jenis turbin yang didasarkan pada nilai putaran spesifik (N_s).
- Kemudian berdasarkan jenis turbin yang didapat selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap komponen utama turbin francis yaitu perhitungan Runner (Roda Turbin), Poros Turbin, Spiral Casing (Rumah Turbin), Guide Vane (Sudu Pengarah) dan Draft Tube.

4. Hasil dan Pembahasan

Data awal dalam perancangan Turbin Francis ini didapat dari hasil survey lapangan pada lokasi rencana yaitu didesa Lhok Sandeng, Kecamatan

Meurah Dua, Kabupaten Pidie jaya, Aceh, seperti tabel berikut ini:

Tabel 1. Data awal perancangan

1	Debit (Q)	10 m ³ /s
2	<i>Head</i> (H)	40 m
3	Efisiensi turbin η_t	0,85
4	Putaran turbin (n)	500 rpm
5	Daya Turbin yang direncanakan (N)	3 MW

Untuk mendapatkan jenis turbin yang akan dirancang maka langkah awal menghitung nilai Kecepatan spesifik, berdasarkan persamaan (1) maka diperoleh nilai Kecepatan spesifik adalah 334. Dari harga N_s sebesar 334 maka turbin air yang dipilih sesuai dengan tabel klasifikasi turbin[4] adalah jenis Turbin Francis, kecepatan tinggi.

4.1. Perancangan Runner (Roda Turbin)

Untuk merancang roda turbin, maka akan dihitung beberapa bagian dari roda turbin seperti hasil perhitungan dalam table berikut ini:

Tabel 2. Bagian hasil perhitungan roda turbin

Diameter Poros (D_{sh})	200 mm
Diameter keluaran roda turbin (D_s)	1158 mm
Lebar roda turbin (B)	350,874 mm
Meredional Velocity (C^m)	$C_{m1} = 7,8440$ m/s $C_{m2} = 6,7234$ m/s.
Jumlah sudu	12 Buah

Untuk perancangan poros bahan yang digunakan adalah *JIS G 4103 (SNCM25)*. Berdasarkan nilai diameter poros pada table diatas maka dapat dihitung nilai diameter hub[5] dengan persamaan:

$$D_h = (1,3 \div 1,4) D_{sh} \\ = 270 \text{ mm}$$

Dalam menentukan diameter *inlet* dari *streamline* sentral (D_{1A}) kita menggunakan perbandingan diameter *inlet* dari *streamline* sentral (D_{1A}) dengan diameter keluaran (D_s). Adapun besar

perbandingannya berdasarkan tipe roda turbin[4] yang sesuai untuk $N_s = 334$ dimana persamaan adalah:

$$D_1 = D_{1A} \leq D_s$$

Dari persamaan diatas maka dapat ditentukan nilai dari diameter *inlet central streamline* $D_{1A} = 1158$ mm.

Kemudian menentukan nilai diameter keluaran *central streamline* (D_{2A}), maka kita harus lebih dulu melakukan penggambaran beberapa *streamline* pada setiap sudunya dengan menggunakan *software Auto Cad*, dari hasil penggambaran tersebut maka didapatkan diameter keluaran *central streamline* yaitu 678,08 mm dengan jari-jari 339,04 mm.

Untuk memudahkan dalam menentukan besar kelengkungan sudu (θ) dan momen statis (M_{st}) maka digunakan metode tabel yang berisikan tahapan perhitungan untuk mendapatkan nilai (θ) dan (M_{st}). Pada perancangan ini digunakan 5 buah *streamline* pembantu dan pada setiap *streamline* dilakukan pembagian dan perhitungan titik pertitik untuk mendapatkan sudut kelengkungan (θ) sehingga mendapatkan bentuk profil lengkungan. Tetapi untuk perhitungan jumlah sudu maka hanya *Streamline* Pusat A_1 - A_2 saja yang digunakan. Dari data perhitungan didapat panjang untuk streamline pusat A_1 - A_2 (e) = 0,429 m dan nilai momen statis (M_{st}) = 0,194754 N/m².

Dari proses perhitungan tersebut, maka dapat dilakukan penggambaran sudu dan roda turbin dengan menggunakan *software Auto CAD*.

4.2. Pengecekan Dimensi Poros Turbin

Untuk melakukan pengecekan dimensi poros, terlebih dahulu dilakukan beberapa perhitungan agar mendapatkan nilai dari gaya-gaya yang mempengaruhi kekuatan dari poros.

1. Beban dari roda turbin dapat dihitung dengan mempertimbangkan bahan perancangan yang digunakan yaitu bahan *High Chromium Iron* yang mempunyai densitas ($\rho = 7,5$ g/cc) dengan volume = 89212,7 cm³. Berdasarkan harga volume yang didapat maka dapat dihitung nilai dari berat roda turbin yaitu : (w_r) = 6563,8 N.
2. Perhitungan volume dan berat poros yang dilakukan berdasarkan perkiraan awal perancangan roda turbin, sehingga volume dari poros turbin yang dirancang adalah 3868,9 cm³ dan nilai berat poros (w_{sh}) = 297,9N.
3. Torsi yang diakibatkan oleh daya yang ditransmisikan dari energi hidrolik ke energi mekanik dari roda turbin dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Torque = \frac{N \times 60}{2\pi \times n} = 63606,3 Nm$$

4. Putaran dari roda turbin, selain menimbulkan torsi juga menyebabkan timbulnya gaya *thrust* yang umumnya disebut sebagai *hydraulic thrust*. Besarnya *hydraulic thrust*^[2] adalah:

$$T = \frac{K \times D_s^2 \times H}{2,94} = 156810,5 N$$

5. Perhitungan gaya radial yang terjadi pada roda turbin adalah :

$$F_r = K_r \times (H \times \rho_{H_2O} \times g) \times D_1 \times B$$

$$F_r = 60469,3 N$$

Selanjutnya kita dapat melakukan pengecekan dimensi poros turbin yang telah direncanakan dengan material yang digunakan *JIS G 4103 (SNCM25)* yang memiliki $Syp = 964,97$ Mpa dan $Sf = 2$. Sehingga pengecekan keamanan poros sebagai berikut :

$$\tau \leq \frac{Syp}{Sf}$$

Syarat aman[9]:

$$40,51 MPa \leq \frac{964,97 MPa}{2}$$

$$40,51 MPa \leq 482,5 MPa$$

4.3. Perancangan Spiral Casing (Rumah Turbin)

Berdasarkan persamaan (8-17) maka didapat dimensi rumah turbin seperti dibawah ini:

Tabel 3. Hasil perhitungan dimensi rumah turbin

A	1311 mm
B	1495 mm
C	1727 mm
D	1934 mm
E	1392 mm
F	1688 mm
G	1524 mm
I	332 mm
L	1182 mm
M	700 mm

Dari hasil perhitungan tersebut, maka dapat dilakukan penggambaran rumah turbin dengan menggunakan *software Auto CAD*.

4.4. Perancangan Guide Vane (Sudu Pengarah)

Dalam perancangan Sudu Pengarah kita membutuhkan salah satu komponen dimensi utama

dari rumah turbin yaitu diameter *inlet ring guide vane* (G). Dari hasil perhitungan dimensi utama rumah turbin telah didapatkan nilai G adalah 1524 mm. Maka jumlah *Guide Blades* sesuai persamaan (18) adalah 13 buah

a) *Outlet blade angle*

Untuk merancang *outlet blade angle*, digunakan grafik *The guide vane maximum angle a_0 at full load* sebagai fungsi dari putaran spesifik (N_s).^[7] Berdasarkan grafik tersebut maka untuk nilai putaran spesifik (N_s) sebesar 334 nilai dari *outlet blade angle* adalah sebesar 39° .

b) Diameter range peletakan *guide vane*

Setelah itu kita dapat menghitung diameter untuk range peletakan *guide vane*^[7] dengan persamaan berikut ini:

$$D_0 = D_1(0,29\Omega + 1,07)$$

$$D_0 = 1.158\text{mm} \times (0,29 \times (1,1220) + 1,07)$$

$$D_0 = 1615,85 \text{ mm}$$

Dari hasil perhitungan, maka dapat dilakukan penggambaran dari *guide vane* dengan menggunakan *software Auto CAD*.

4.5. Perancangan Draft Tube.

Pada perancangan *Draft Tube* juga digunakan metode empirik dengan nilai putaran spesifik (N_s) sama halnya dengan pada perancangan rumah turbin yaitu $N_s = 287$. Dari data tersebut dan persamaan (19-28) maka didapat dimensi *Draft Tube* seperti berikut :

Tabel 4. Hasil perhitungan dimensi *draft tube*

N	2604 mm
O	1529 mm
P	1400 mm
Q	763 mm
R	1853 mm
S	5320 mm
T	1800 mm
U	358 mm
V	1490 mm
Z	3182 mm

Dari hasil perhitungan tersebut, maka dapat dilakukan penggambaran *draft tube* dengan menggunakan *software Auto CAD*.

4. Kesimpulan

Rancangan turbin Francis yang sesuai untuk Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro di Lhok Sandeng Kabupaten Pidie Jaya dengan daya Turbin yang direncanakan $N \geq 3.000$ KW adalah jenis

Turbin Francis kecepatan tinggi dengan dimensi utama dari roda turbin adalah :

Diameter Poros (D_{sh})	200 mm
Diameter keluaran roda turbin (D_s)	1158 mm
Lebar roda turbin (B)	350,874 mm
Meredional Velocity (C^m)	$C_{m1} = 7,8440$ m/s $C_{m2} = 6,7234$ m/s.
Jumlah sudu	12 Buah

Daftar Pustaka

- [1] Sharma, K.N. and M.M Dandekar, 1991, *Pembangkit Listrik Tenaga Air*, Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press).
- [2] Warnick, C.C., 1984, *Hydropower Engineering*, New Jersey: Prentice Hall Inc, Englewood Cliffs.
- [3] Dietzel, Fritz, 1996, *Turbin, Pompa dan Kompresor*, Jakarta: Erlangga.
- [4] Nechleba, Miroslav, 1957, *Hydraulic Turbine Their Design and Equipment*, Czechoslovakia: Artia Pragu.
- [5] Lazarkiewicz S, Troskolanski A. T., 1957, *Impeller Pumps*, 2nd.ed. London: John Wiley and Sons.
- [6] Siervo F de, Leva F de, 1976, Modern design trends in selecting and designing Francis turbines, *Water Power & Dam Construction*, Vol. 28, No.8, pp 28-35
- [7] Paish, Oliver, 2002, *Small Hydro Power: Technology and Current Status*, Chichester : IT Power Ltd.
- [8] Kjolle, A., 1980, *Water Power Machines* (in Norwegian).
- [9] Deutschman, Aaron D., Michels, Walter J. and Wilson, Charles E. *Machine Design theory and practice*.