

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Energi

Secara global telah diketahui bersama bahwa sumber energi tak terbarui semakin berkurang keberadaannya maka sudah selayaknya untuk dicari dan digalakan penemuan-penemuan atau pemanfaatan-pemanfaatan energi-energi alternatif. Di alam semesta ini sebenarnya banyak terdapat energi alternatif hanya saja dikarenakan keterbatasan dari kemampuan manusia maka semua energi alternatif yang ada belum dapat dimanfaatkan secara maksimal dan integral. Beberapa contoh energi alternatif yang sudah banyak dimanfaatkan antara lain adalah; energi angin, energi air, energi matahari dan sebagainya. Energi adalah kemampuan untuk melakukan suatu usaha. Energi tidak dapat dimusnahkan dan tidak dapat diciptakan tetapi dapat dirubah bentuknya dari bentuk energi yang satu ke bentuk energi yang lainya. Sebagai contoh, pada proses pembakaran akan terjadi perubahan bentuk energi yaitu dari energi kimia menjadi energi panas

Sumber energi secara umum dikelompokkan menjadi dua kelompok besar yaitu energi tak terbarui dan energi terbarui. Energi tak terbarui diantaranya adalah energi mineral atau fosil seperti minyak bumi, batu bara dan sebagainya sedangkan energi terbarui diantaranya adalah energi air, energi angin, energi limbah pertanian dan sebagainya.

B. Turbin Air

Dalam suatu system Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), turbin air merupakan salah satu peralatan utama selain generator. Turbin air adalah alat untuk mengubah energi air menjadi energi puntir. Energi puntir (momen) ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator.

Teori turbin air bertujuan untuk mendapatkan unjuk kerja optimum dalam pemanfaatan energi air pada suatu kondisi operasi tertentu. Dasar kerja turbin air yang sangat sederhana sudah diketemukan sebelum dimulainya tahun masehi. Teknologi turbin air merupakan perkembangan dari kincir air (water wheel). Perbedaan utama dari kincir air dan turbin adalah bahwa kincir air hanya mengubah kecepatan aliran, sedangkan turbin air mengubah arah dan kecepatan aliran (Wibowo P, 2007)

Turbin air dikembangkan pada abad 19 dan digunakan secara luas untuk tenaga industry, dan untuk jaringan listrik. Sekarang lebih umum dipakai untuk generator listrik. Turbin ini dimanfaatkan secara luas dan merupakan sumber energi yang dapat diperbaharukan. (Galih, 2008)

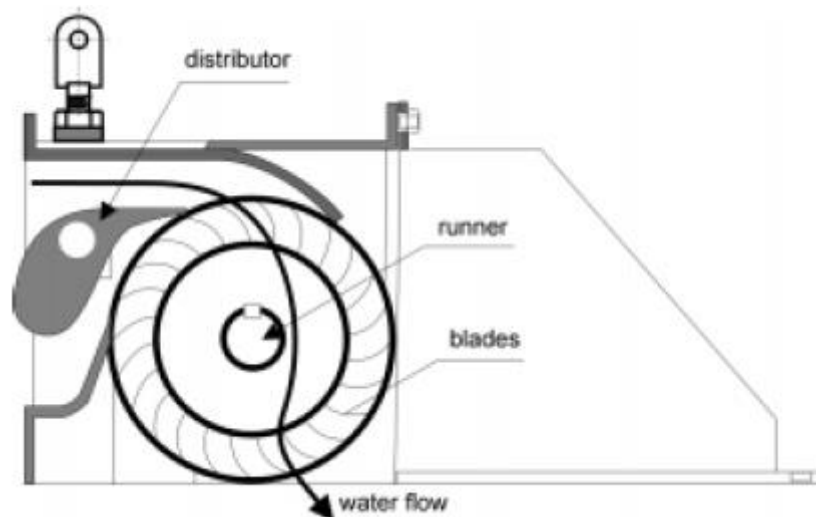
▪ Jenis-Jenis Turbin

Secara umum terdapat dua jenis utama turbin, yaitu turbin impuls dan turbin reaksi. Pada turbin impuls, pancaran air bebas mendorong bagian turbin yang berputar yang ditempatkan pada tekanan atmosfer. Pada turbin reaksi, aliran air terjadi dengan tekanan pada ruang tertutup. Meskipun energi yang diberikan kepada turbin impuls adalah semata-mata energi kinetik, tetapi kedua jenis turbin tersebut tergantung kepada

perubahan momentum air, sehingga gaya dinamikalah yang mengenai bagian yang berputar atau *runner* dari turbin tersebut.

- 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. (Luknanto, 2003). Jenis-jenis turbin impuls sendiri yaitu: pelton, turgo, Michell-Banki (Crossflow atau ossberger).

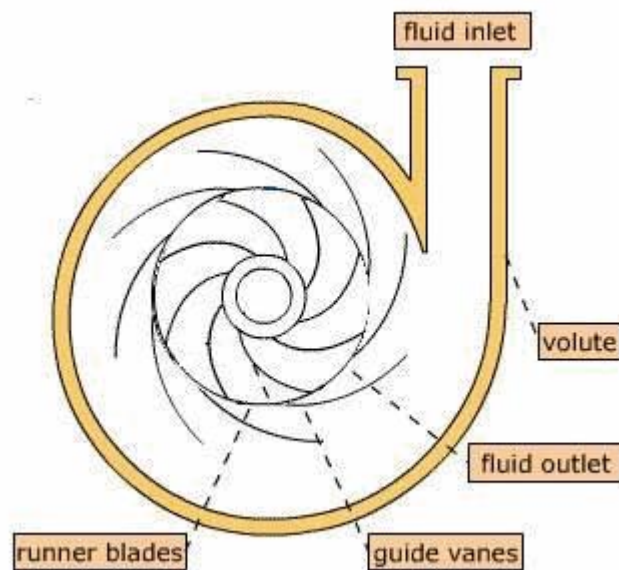


Gambar 1. Gambaran umum turbin impuls
(<http://europa.eu.int/en/comm/dg17/hydro/layman2.pdf>)

- Turbin Reaksi

Turbin dikenal juga sebagai roda air tangensial atau roda pelton, mengambil nama orang yang telah mengembangkannya menjadi rencana dasar yang dipakai saat ini. Sudu pada turbin reaksi mempunyai profil khusus yang menyebabkan terjadinya penurunan

tekanan air selama melalui sudu. Perbedaan tekanan ini memberikan gaya pada sudu sehingga *runner* (bagian turbin yang berputar) dapat berputar. Turbin yang bekerja berdasarkan prinsip ini dikelompokkan sebagai turbin reaksi. Runner turbin reaksi sepenuhnya tercelup dalam air dan berada dalam rumah turbin.



Gambar 2. Gambaran umum turbin reaksi
(<http://lingolex.com/bilc/engine.html>)

▪ Mikrohidro Power

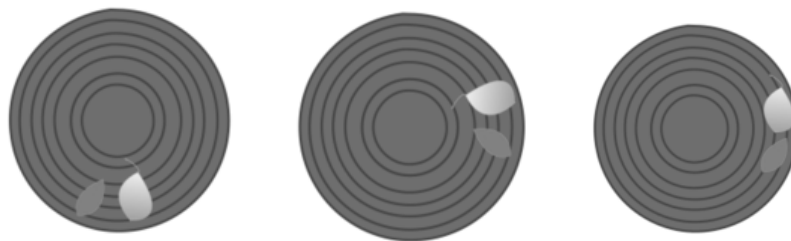
Micro-Hydro Power adalah pemanfaatan energi skala kecil dari air terjun, sebagai contoh pemanfaatan air sungai untuk energi industry kecil atau perkampungan. Micro-Hydro Power diklasifikasikan berdasarkan ukurannya sebagai berikut: (<http://phetchabun2.net>)

- Large hydro = lebih dari 100 MW dan biasanya untuk memberi energi jaringan listrik yang besar.
- Medium hydro = 15-100 MW

- Small hydro = 1-15 MW
- *Mini Hydro* = diatas 100 kW tapi dibawah 1MW,
- *Micro hydro* = dari 5 kW sampai 100 kW, biasanya energi yang diberikan untuk komunitas atau industri pedesaan di daerah yang jauh dari jaringan listrik.
- *Pico Hydro* = dari beberapa ratus watt sampai 5 kW.

C. Aliran pusaran (*vortex*)

Sebuah fluida berputar dikenal sebagai pusaran. Gerakan fluida dengan cepat berputar-putar di sekitar pusat pusaran disebut aliran Vortex. Terdapat dua jenis vortex Salah satunya adalah disebut vorteks bebas, dan yang lainnya adalah vortex paksa. Sebuah pergerakan vortex juga dapat dicirikan sebagai gerak pusaran silinder dan gerak pusaran spiral. Sebuah contoh yang baik dari sebuah pusaran adalah fenomena atmosfer, angin puyuh atau tornado. Pada skala yang lebih kecil, yang biasanya terbentuk pusaran air seperti dalam sebuah wastafel atau toilet.. (<http://kpvrajmechtutorials.blogspot.com/2009/05/vortex-motion-free-and-forced-vortices.html>)



Gambar 3. Tipe pergerakan aliran vortex

Vortex memiliki beberapa sifat-sifat khusus:

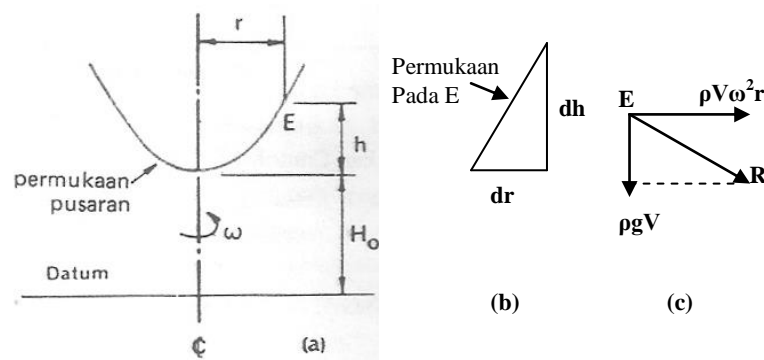
- Tekanan fluida dalam sebuah vortex bernilai paling rendah dipusatnya dimana pada kondisi ini kecepatannya paling tinggi, dan naik secara bertahap sesuai dengan pengaruh jarak dari pusat. Hal ini sesuai dengan persamaan bernoulli.
- Inti dari setiap vortex dapat dibayangkan mengandung sebuah garis vortex dan setiap partikel dalam vortex dapat dianggap bersirkulasi disekitar garis vortex. Garis-garis vortex berawal dan berakhir pada lapis batas dari fluida tetapi garis-garis tersebut tidak bermula atau berakhir dalam fluida.
- Dua atau lebih vortex yang kira-kira parallel dan bersirkulasi dalam arah yang sama akan dengan cepat bergabung untuk membentuk sebuah vortex tunggal. Sirkulasi dari vortex yang bergabung akan sama dengan jumlah sirkulasi komponen-komponen pembentuk vortex
- Vortex mengandung energi yang besar dalam gerakan sirkular fluida. Dalam sebuah fluida ideal energi ini tidak pernah dapat didisipasi dan vortex akan tetap ada seterusnya. Bagaimanapun, fluida nyata menganut adanya viskositas dan disipasi energi vortex akibat viskositas yang mana garis vortex dapat berakhir pada ujung dalam fluida.

D. Tipe pusaran (*vortex*)

1. Pusaran dengan paksaan

Secara matematis, suatu pusaran dengan paksaan mempunyai karakteristik bahwa setiap tetes dari cairan di dalamnya mempunyai kecepatan sudut sama, ω , sehingga kecepatan tangensial pada jari-jari r dari pusat pusaran adalah $u = \omega r$. Pada pusat dimana $r = 0, u = 0$. Potongan melalui pusaran dengan paksaan terlihat pada gambar 4a.

Jejak dari setiap elemen cairan seperti E (gambar 4a) adalah suatu lingkaran sekitar garis tengah pusaran. Akibatnya resultanya, R , dari gaya-gaya (berat dan gaya sentrifugal yang bekerja pada E harus tegak lurus pada permukaan di E, terlihat pada skala yang diperbesar dalam (Gambar 4b).



Gambar 4. Pusaran dengan paksaan (a) potongan melalui pusaran dengan paksaan, (b) kemiringan permukaan pada E (c) gaya –gaya yang bekerja pada elemen E (Dugdale, 1986)

Segitiga kecepatan (Gambar 4b) dan (Gambar 4c) harus sama, sehingga didapatkan (Dugdale, 1986)

$$\frac{dh}{dr} = \frac{\rho V \omega^2 r}{\rho g V} = \frac{\omega^2 r}{g} \dots\dots\dots (9)$$

Dimana V = volume dari E

$$\therefore h = \int \frac{\omega^2 r}{g} dr = \frac{\omega^2 r^2}{2g} + C \dots\dots\dots (10)$$

dimana C = konstan.

Dari gambar 4 (a), $h=0$ kalau $r=0$, dan $\therefore C=0$

$$\text{yaitu } h = \frac{\omega^2 r^2}{2g} = \frac{u^2}{2g} \dots\dots\dots (11)$$

yang merupakan persamaan dari permukaan bebas.

Apabila head total pada $r=0$ adalah H_o , maka pada jari-jari r

Head total $H = H_o + h + \frac{u^2}{2g}$, $\frac{u^2}{2g}$ adalah head kecepatan

$$\begin{aligned} H &= H_o + \frac{u^2}{2g} + \frac{u^2}{2g} \\ \text{Sehingga} \quad &= H_o + \frac{u^2}{2g} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

H berubah kalau r berubah, yaitu dalam pusaran-pusaran dengan paksaan head total berubah dari garis arus ke garis arus. Oleh karena itu persamaan Bernoulli berlaku sepanjang suatu garis Bernoulli selalu berlaku sepanjang

suatu garis arus (*streamline*), tidak dapat dipakai dari satu garis arus ke garis arus yang lain tanpa pandang bulu. (Dugdale, 1986)

2. Pusaran Bebas (Free Vortex)

Suatu pusaran bebas adalah fenomena yang timbul ketika air bak dibiarkan keluar melalui lubang keluar. Seperti pada pusaran dengan paksaan, garis-garis arus adalah lingkaran-lingkaran konsentris tetapi tidak seperti pusaran dengan paksaan, kecepatan tangensial u , pada jari-jari r diberikan dengan : (Dugdale, 1986)

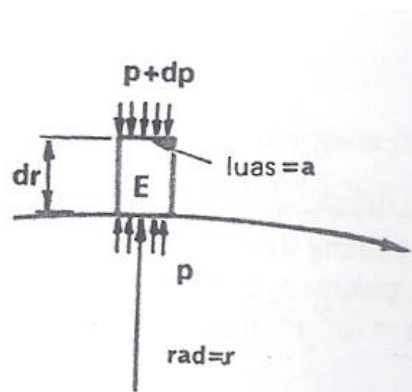
$$ur = K, \text{ suatu konstan}$$

karena Head total, H , adalah fungsi dari p , u dan z , maka :

$$\frac{dH}{dr} = \frac{\partial H}{\partial r} \frac{dp}{dr} + \frac{\partial H}{\partial u} \frac{du}{dr} + \frac{\partial H}{\partial z} \frac{dz}{dr} \dots\dots\dots (13)$$

dan karena $H = \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + z$ pada garis arus,

$$\frac{\partial H}{\partial p} = \frac{1}{\rho g}; \frac{\partial H}{\partial u} = \frac{u}{g}; \frac{\partial H}{\partial z} = 1 \dots\dots\dots (14)$$



Gambar 5. Teori pusaran bebas (Dugdale, 1986)

Gambar 5 menunjukkan elemen E akan mengalir sepanjang jejak melengkung hanya bila tekanan pada sebelah luar lebih besar daripada sebelah dalam dengan sejumlah dp , maka:

Gaya radial kedalam = $a dp$ = Massa x Percepatan

$$= \rho a dr \times \frac{u^2}{r} \dots\dots\dots (15)$$

$$\therefore \frac{dp}{dr} = \frac{\rho u^2}{r}$$

karena $u = \frac{K}{r}$, $\frac{du}{dr} = -\frac{K}{r^2} = -\frac{u}{r} \dots\dots\dots (16)$

dengan mensubstitusi pers. (14), (15), (16) kedalam pers. (13) didapat,

$$\frac{dH}{dr} = \frac{dz}{dr}$$

Pada bidang horizontal, $\frac{dz}{dr} = 0$, sehingga H konstan. Kenyataannya, H konstan untuk semua garis arus, maka bila suffix 1 dan 2 menandakan kondisi-kondisi dari dua garis arus.

$$H = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + z_2 \dots\dots\dots (17)$$

Karena pada tiap titik,

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{C^2}{2gr^2} = H \dots\dots\dots (18)$$

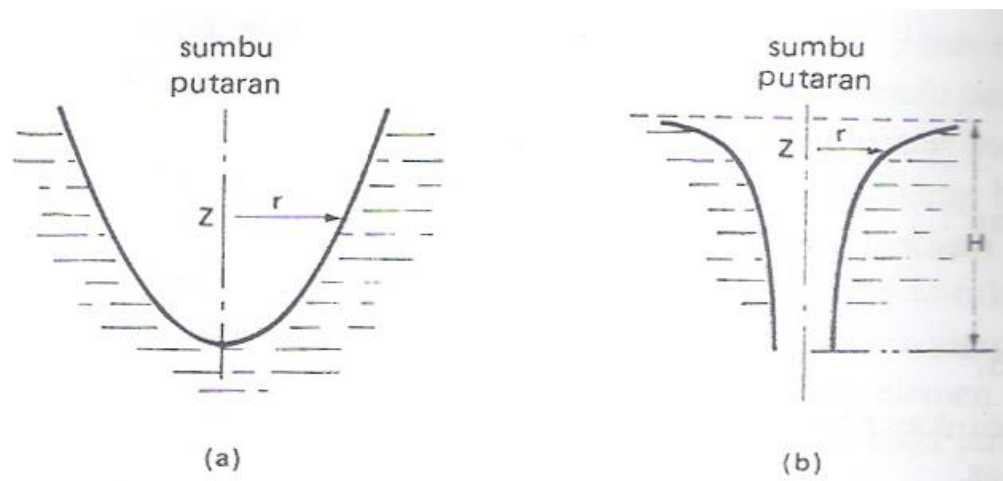
Jika fluida pada kondisi permukaan bebas, $\frac{p}{\rho g} = 0$ dan profil pada permukaan bebas diberikan sebagai berikut:

$$H - z = \frac{C^2}{2gr^2} \dots\dots\dots (19)$$

Untuk tiap-tiap bidang horizontal, z adalah konstan dan variasi tekanan diberikan sebagai:

$$\frac{p}{\rho g} = (H - z) - \frac{C^2}{2gr^2} \dots\dots\dots (20)$$

Sehingga pada vortex bebas, tekanan menurun dan circumferensial kecepatan naik ketika bergerak mendekati pusat vortex. (J.F Douglas, 1995)



Gambar 6. Penampang melalui permukaan bebas dari (a) pusaran dengan paksaan dan (b) pusaran bebas (*Dugdale, 1986*)

E. Perhitungan Pada Turbin

1. Perhitungan Daya Potensial Air

Perhitungan ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar potensi yang tersedia dari sebuah sumber daya. Hal ini penting untuk kepentingan perancangan suatu pembangkit, sehingga diketahui seberapa besar suatu pembangkit akan dibuat.

Besarnya tenaga air yang tersedia dari suatu sumber air bergantung pada besarnya head dan debit air. Dalam hubungan dengan reservoir air maka head adalah beda ketinggian antara muka air pada reservoir dengan muka air keluar dari kincir air/turbin air. Total energi yang tersedia dari suatu reservoir air adalah merupakan energi potensial air yaitu :

$$E = mgh \dots\dots\dots (21)$$

dengan

m adalah massa air

h adalah head (m)

g adalah percepatan gravitasi $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

Daya merupakan energi tiap satuan waktu $\left(\frac{E}{t}\right)$, sehingga persamaan

(19) dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{E}{t} = \frac{m}{t} gh$$

Dengan mensubsitusikan P terhadap $\left(\frac{E}{t}\right)$ dan mensubsitusikan ρQ

terhadap $\left(\frac{m}{t}\right)$ maka :

$$P = \rho Qgh \dots\dots\dots (22)$$

dengan

P adalah daya (watt) yaitu

Q adalah kapasitas aliran $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

ρ adalah densitas air $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

Selain memanfaatkan air jatuh hydropower dapat diperoleh dari aliran air datar. Dalam hal ini energi yang tersedia merupakan energi kinetik

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots (23)$$

dengan

v adalah kecepatan aliran air $\left(\frac{m}{s}\right)$

Daya air yang tersedia dinyatakan sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2}\rho Qv^2 \dots\dots\dots (24)$$

atau dengan menggunakan persamaan kontinuitas $Q = Av$ maka

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \dots\dots\dots (25)$$

dengan

A adalah luas penampang aliran air (m^2)

2. Perhitungan Daya Teoritik Turbin

Daya teoritis adalah daya yang seharusnya diterima oleh poros turbin secara utuh, dengan mengabaikan rugi-rugi statis dan dinamis saat sistem bekerja.

Gaya yang bekerja diberikan sebagai berikut:

$$F = P \times A$$

$$dF = p dA$$

$$dF = p \, dr dz$$

$$dF = \rho g \left((H - z) - \frac{C^2}{2gr^2} \right) dr dz \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$F = \rho g \int_{z_1}^{z_2} \int_{r_1}^{r_2} \left((H - z) - \frac{C^2}{2gr^2} \right) dr dz$$

$$F = \rho g \int_{z_1}^{z_2} \left[(H - z)r + \frac{C^2}{2gr} \right]_{r_1}^{r_2} dz$$

Dimana A adalah luas area sudu yang terkena momentum air.

Torsi yang dihasilkan:

$$T = F \times r \quad \dots\dots\dots (27)$$

Menghitung daya poros (Pb)

$$Pb = 2\pi \left(\frac{nT}{60} \right) \quad \dots\dots\dots (28)$$

Menghitung daya hidraulis (Ph)

$$Ph = \rho Q g H \dots\dots\dots (29)$$

Menghitung efisiensi turbin

$$\eta = \frac{\text{Daya Poros}}{\text{Daya Hidro}} \times 100\% \dots\dots\dots (30)$$

3. Daya Aktual yang dihasilkan Turbin

Energi yang dihasilkan turbin adalah energi yang diperoleh dari kerja turbin, nilai energi diperoleh dari proses pengambilan data berupa torsi dan kecepatan putar poros turbin.

Kecepatan sudut diberikan dalam:

$$\omega = 2\pi \left(\frac{n}{60} \right) \dots\dots\dots (31)$$

Daya poros turbin diberikan dalam pers (32):

$$P_{\text{turbin}} = 2\pi \left(\frac{nT}{60} \right) \dots\dots\dots (32)$$

4. Efisiensi

Efisiensi merupakan perbandingan dari energi yang termanfaatkan dengan potensial energi yang tersedia, secara matematis diberikan:

$$\eta = \frac{P_{\text{turbin}}}{P_{\text{air}}} \times 100\% \dots\dots\dots (33)$$

5. Kecepatan spesifik

Kecepatan spesifik (n_s), menunjukkan bentuk dari turbin itu dan tidak berhubungan dengan ukurannya. Hal ini menyebabkan desain turbin baru yang diubah skalanya dari desain yang sudah ada dengan performa yang sudah diketahui. Kecepatan spesifik merupakan kriteria utama yang

menunjukkan pemilihan jenis turbin yang tepat berdasarkan karakteristik sumber air. Kecepatan spesifik dari sebuah turbin juga dapat diartikan sebagai kecepatan ideal, persamaan geometris turbin, yang menghasilkan satu satuan daya tiap satu satuan head. Kecepatan spesifik turbin diberikan oleh perusahaan (dengan penilaian yang lainnya) dan selalu dapat diartikan sebagai titik efisiensi maksimum. Perhitungan tepat ini menghasilkan performa turbin dalam jangkauan head dan debit tertentu.

$$n_s = n \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \dots\dots\dots (34)$$