



MODUL MESIN FLUIDA

UNIVERSITAS HARAPAN MEDAN
Fakultas Teknik dan Komputer
2022

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Modul mata kuliah Mesin Fluida (21-3-09-4-6-03-3) ini berhasil disusun dengan semaksimal mungkin. Modul ini disusun mengacu pada silabus mata kuliah yang diberlakukan untuk program S1 yang disajikan pada tiap semester dengan jumlah SKS 3 (Tiga). Modul ini diterbitkan untuk kalangan sendiri pada Program Teknik Mesin FAKULTAS TEKNIK DAN KOMPUTER UNIVERSITAS HARAPAN MEDAN .Penulis mengucapkan terimakasih atas suport dan masukan yang diberikan teman teman Dosen di Fakultas Teknik dan Komputer Universitas Harapan Medan, selama penyusunan Modul ini.

Modul mata kuliah Elemen Mesin I ini diharapkan bisa membantu mahasiswa dalam memahami materi yang disampaikan Dosen. Dalam diktat ini menyajikan bermacam-macam contoh soal dan latihan soal dalam setiap BAB, yang mana mahasiswa diharapkan bisa memanfaatkan dengan baik untuk memperkuat pemahaman materi setiap BAB. Namun demikian, mahasiswa sebaiknya juga membaca buku-buku referensi yang lain tentang Proses Pengecoran Logam sehingga diperoleh informasi yang lebih lengkap dalam upaya memahami materi perkuliahan.

Bagaimanapun, diktat ini masih diperlukan perbaikan secara bertahap, oleh karena itu mohon kritik dan saran untuk kesempurnaan diktat ini.

Kami menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang membantu penulisan diktat ini. Semoga bermanfaat bagi pembaca.

Medan, Januari 2022

Penulis

(Ir.Junaidi,M.M.,M.T.)
NIDN :0103036301

DAFTAR ISI

| | |
|---|---------------|
| 1. Impact of Jet | 1 - 1 |
| .1 Pendahuluan | 1 - 1 |
| .2 Gaya dari Jet yang menumbuk Plat Diam secara normal (tegak lurus) | 1 - 1 |
| .3 Gaya dari Jet yang menumbuk Plat Diam Miring | 1 - 4 |
| .4Gaya dari Jet yang menumbuk Plat pada Engsel | 1 - 7 |
| .5Gaya dari Jet yang menumbuk Plat yang Bergerak | 1 - 12 |
| .6Gaya dari Jet yang menumbuk Rangkaian Sudu yang Bergerak | 1 - 14 |
| Tutorial | 1 - 18 |
| .7Gaya dari Jet yang menumbuk Sudu Lengkung yang Diam | 1 - 20 |
| .8Gaya dari Jet yang menumbuk Sudu Lengkung yang Bergerak | 1 - 22 |
| Tutorial | 1 - 35 |
| | |
| 2. Water Wheels | 2 - 1 |
| 2.1 Jenis-Jenis Water Wheels | 2 - 1 |
| 2.2 Overshot Water Wheel | 2 - 2 |
| 2.3 Breast Water Wheel | 2 - 6 |
| 2.4 Undershot Water Wheel | 2 - 8 |
| 2.5 Poncelet Water Wheel | 2 - 10 |
| 2.6 Keuntungan & Kelemahan Water Wheels | 2 - 13 |
| 2.7 Pengembangan Water Wheels | 2 - 13 |
| 2.8 Keuntungan Turbin Air | 2 - 14 |
| 2.9 Klasifikasi Turbin Air | 2 - 14 |
| Tutorial | 2 - 15 |
| Ringkasan | 2 - 16 |
| Pertanyaan | 2 - 17 |
| | |
| 3. Turbin Impuls | 3 - 1 |
| 3.1 Pendahuluan | 3 - 1 |
| 3.2 Pelton Wheel | 3 - 1 |

| | | |
|-------------|---|---------------|
| 3.3 | Nozzle | 3 - 2 |
| 3.4 | Runner & Buckets | 3 - 2 |
| 3.5 | Casing | 3 - 3 |
| 3.6 | Braking Jet | 3 - 3 |
| 3.7 | Kerja yang dilakukan oleh Turbin Impuls | 3 - 4 |
| 3.8 | Daya yang dihasilkan Turbin Impuls | 3 - 8 |
| 3.9 | Efisiensi Turbin Impuls | 3 - 9 |
| 3.10 | Efisiensi Hidrolik | 3 - 9 |
| 3.11 | Efisiensi Mekanik | 3 - 9 |
| 3.12 | Efisiensi Keseluruhan | 3 - 10 |
| | Tutorial | 3 - 22 |
| 3.13 | Jumlah Jet untuk Pelton Wheel | 3 - 23 |
| 3.14 | Ukuran Bucket dari Pelton Wheel | 3 - 26 |
| 3.15 | Jumlah Bucket dari Pelton Wheel | 3 - 26 |
| 3.16 | Desain Pelton Wheel | 3 - 30 |
| | Tutorial | 3 - 33 |
| | Pertanyaan | 3 - 34 |
| | | |
| 4. | Turbin Reaksi | 4 - 1 |
| 4.1 | Pendahuluan | 4 - 1 |
| 4.2 | Komponen Utama Turbin Reaksi | 4 - 1 |
| 4.3 | Penstock | 4 - 1 |
| 4.4 | Casing Spiral | 4 - 2 |
| 4.5 | Mekanisme Guide | 4 - 2 |
| 4.6 | Turbine Runner | 4 - 3 |
| 4.7 | Perbedaan antara Turbin Impuls & Turbin Reaksi | 4 - 4 |
| 4.8 | Klasifikasi Turbin Reaksi | 4 - 4 |
| 4.9 | Turbin aliran Radial | 4 - 5 |
| 4.10 | Turbin Aliran Aksial | 4 - 5 |
| 4.11 | Turbin Aliran Campur | 4 - 5 |
| 4.12 | Turbin Reaksi Aliran Inward (Menuju Pusat Turbin) | 4 - 5 |

| | |
|--|---------------|
| 4.13 Kerja yang Dihasilkan oleh Turbin Reaksi Aliran Inward | 4 - 6 |
| 4.14 Turbin Reaksi Aliran Outward (Menjauhi Pusat Turbin) | 4 - 16 |
| Tutorial | 4 - 20 |
| 4.15 Debit suatu Turbin Reaksi | 4 - 21 |
| 4.16 Daya yang Dihasilkan oleh Turbin Reaksi | 4 - 27 |
| 4.17 Efisiensi Turbin Reaksi | 4 - 27 |
| 4.18 Efisiensi Hidrolik | 4 - 28 |
| 4.19 Efisiensi Mekanik | 4 - 28 |
| 4.20 Efisiensi Keseluruhan | 4 - 29 |
| 4.21 Turbin Francis | 4 - 56 |
| 4.22 Turbin Kaplan | 4 - 61 |
| 4.23 Draft Tube | 4 - 68 |
| 4.24 Jenis-Jenis Draft Tube | 4 - 68 |
| 4.25 Conical Draft Tube | 4 - 68 |
| 4.26 Elbow Draft Tube | 4 - 69 |
| 4.27 Efisiensi suatu Draft Tube | 4 - 70 |
| 4.28 Kavitasi | 4 - 73 |
| Tutorial | 4 - 75 |
| Do You Know ? | 4 - 79 |
| | |
| 5. Performansi Turbin | 5 - 1 |
| 5.1 Pendahuluan | 5 - 1 |
| 5.2 Karakteristik Turbin | 5 - 1 |
| 5.3 Daya Satuan | 5 - 2 |
| 5.4 Kecepatan Satuan | 5 - 3 |
| 5.5 Debit Satuan | 5 - 4 |
| 5.6 Signifikansi Daya Satuan, Kecepatan Satuan & Debit Satuan | 5 - 5 |
| Tutorial | 5 - 10 |
| 5.7 Kecepatan Spesifik suatu Turbin | 5 - 11 |
| 5.8 Signifikansi Kecepatan Spesifik | 5 - 21 |
| 5.9 Pemilihan Turbin | 5 - 21 |

| | | |
|-------------|---|---------------|
| 5.10 | Pemilihan berdasarkan Kecepatan Spesifik | 5 - 22 |
| 5.11 | Pemilihan berdasarkan Head dari Air | 5 - 23 |
| 5.12 | Kurva Karakteristik dari Turbin | 5 - 26 |
| 5.13 | Kurva Karakteristik Roda Pelton (Pelton Wheel) | 5 - 27 |
| 5.14 | Kurva Karakteristik Turbin Francis | 5 - 28 |
| 5.15 | Kurva Karakteristik Turbin Francis untuk Kecepatan dengan Variasi Head | 5 - 28 |
| 5.16 | Kurva Karakteristik Turbin Francis untuk Kecepatan pada Head Satuan | 5 - 31 |
| | Tutorial | 5 - 33 |
| | Do You Know ? | 5 - 34 |

1. Impact of Jet

1.1 Pendahuluan

Mesin-mesin fluida adalah mesin digunakan untuk mengubah **energi mekanik** menjadi **energi aliran** atau sebaliknya.

Contohnya :

Energi Mekanik → Energi Aliran misal : Pompa, Kompresor

Energi Aliran → Energi Mekanik misal : Turbin (Uap, Air, Gas)

Pengertian Impact of Jet :

Pancaran (jet) dari suatu fluida selalu mempunyai kecepatan, oleh karena itu jet (semburan) juga mempunyai **energi kinetik**.

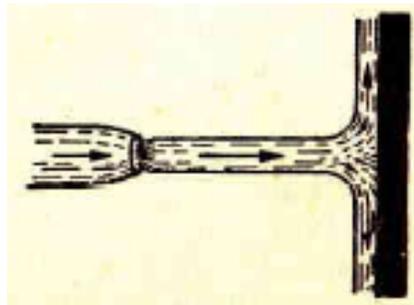
Jika ada penghalang yang berada pada lintasan gerak dari jet tersebut, maka penghalang tersebut akan menerima gaya dinamik (*dynamic force*) yang disebut sebagai : **Impact of Jet**.

Jet atau semburan fluida jika menumbuk suatu plat yang diam akan terjadi gaya pada plat tersebut. Besarnya gaya ini sama dengan **laju perubahan momentum** dari jet tersebut.

Jika plat tidak diam maka plat akan bergerak dalam arah gerak jet (semburan).

1.2 Gaya dari Jet yang menumbuk Plat Diam secara normal (tegak lurus)

Perhatikan suatu jet (semburan) air yang menumbuk secara normal (tegak lurus) pada plat diam seperti gambar di dibawah ini.



Gambar 1.1

Jika jet air menumbuk plat diam maka kecepatan jet akan turun & menjadi nol (0 atau diam) sesudah tumbukan (dalam arah jet).

Gaya Normal pada Plat = Laju Perubahan Momentum
 = Perubahan Momentum / detik
 = (Massa fluida yg menumbuk plat / detik) x
 (perubahan kecepatan normal terhadap plat)

Gaya yang dikenakan oleh jet pada plat diam (F) :

$$\begin{aligned}
 F &= \dot{m} \cdot \Delta V = (\rho \cdot a \cdot V) \cdot (V - 0) \\
 &= \left(\frac{w}{g} \cdot a \cdot V \right) \cdot V \\
 F &= \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \text{ [kgf]}
 \end{aligned}
 \qquad
 \begin{aligned}
 w &= \rho \cdot g \\
 \rho &= \frac{w}{g}
 \end{aligned}$$

Dengan :

V = kecepatan jet [m/s]
 a = luas penampang lintang jet [m²]
 w = berat jenis [kgf/m³]

Laju Aliran massa air :

$$\dot{m} = \frac{w \cdot a \cdot V}{g}$$

Example 1 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 10 cm menumbuk secara normal (tegak lurus) suatu plat diam dengan kecepatan 30 m/s. Tentukan gaya yang terjadi pada plat tersebut !

Jawab :

Diameter jet, $D = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Luas Penampang Jet, $a = \frac{\pi}{4} \cdot (0,1 \text{ m})^2 = 0,007854 \text{ m}^2$

Kecepatan Jet, $V = 30 \text{ m/s}$

Jadi, gaya yang terjadi pada plat sebesar :

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \\
 &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,007854 \text{ m}^2 \times (30 \text{ m/s})^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \\
 &= 720,55 \text{ kgf}
 \end{aligned}$$

Example 2 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 5 cm keluar dari suatu pipa dengan suatu head konstan sebesar 70 m. Tentukan gaya yang diakibatkan oleh jet tersebut pada suatu plat diam ! Asumsikan koefisien kecepatan (C_v) sebesar 0,9.

Jawab :

Diameter jet, $D = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$

Luas Penampang Jet, $a = \frac{\pi}{4} \cdot (0,05 \text{ m})^2 = 0,00196 \text{ m}^2$

Head Air, $h = 70 \text{ m}$

Koefisien Kecepatan, $C_v = 0,9$

Kecepatan Jet :

$$V = C_v \cdot \sqrt{(2 \cdot g \cdot h)} = 0,9 \cdot \sqrt{(2 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 70 \text{ m})}$$

$$V = 33,35 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

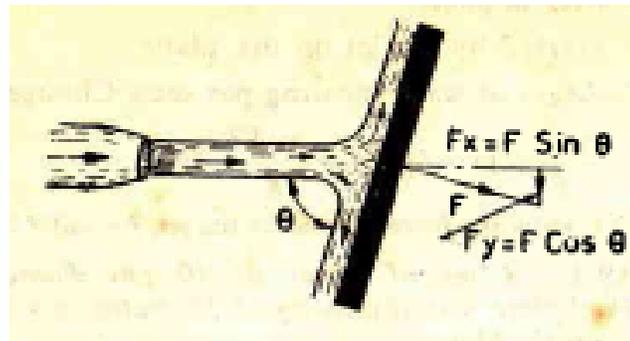
Jadi, gaya yang terjadi pada plat sebesar :

$$F = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g}$$

$$= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,00196 \text{ m}^2 \times (33,35 \text{ m/s})^2}{9,81 \text{ m/s}^2} = 222,22 \text{ kgf} = 2,18 \text{ kN}$$

1.3 Gaya dari Jet yang menumbuk Plat Diam Miring

Perhatikan suatu jet (semburan) pada suatu plat miring pada gambar di samping.



Gambar 1.2

Dengan :

- V = kecepatan jet [m/s]
- a = luas penampang lintang jet [m²]
- θ = sudut antara jet & plat

Gaya Normal pada Plat = Laju Perubahan Momentum
 = Perubahan Momentum / detik
 = (Massa fluida yg menumbuk plat / detik) x
 (perubahan kecepatan normal terhadap plat)

$$F = \dot{m} \cdot \Delta V = (\rho \cdot a \cdot V) \cdot (V - 0)$$

$$= \left(\frac{w}{g} \cdot a \cdot V \right) \cdot V$$

$$F = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \text{ [kgf]}$$

Gaya oleh jet pada arah tegak lurus plat miring :

$$F = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \cdot \sin \theta$$

Gaya oleh jet pada arah aliran :

$$F_x = F \cdot \sin \theta = \left(\frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \cdot \sin \theta \right) \cdot \sin \theta = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \cdot \sin^2 \theta$$

Gaya oleh jet pada arah tegak lurus aliran :

$$\begin{aligned} F_y &= F \cdot \cos \theta = \left(\frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \cdot \sin \theta \right) \cdot \cos \theta = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \left(\frac{2}{2} \right) \\ &= \frac{w \cdot a \cdot V^2}{2 \cdot g} \cdot \sin 2\theta \end{aligned}$$

Dengan : $\sin(2 \cdot \theta) = 2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$

Example 3 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 10 cm bergerak dengan kecepatan 20 m/s menumbuk suatu plat yang diam. Tentukan gaya normal pada plat jika :

- Plat tegak lurus terhadap semburan (jet)
- Sudut antara jet & plat sebesar $\theta = 45^\circ$

Jawab : Diameter jet, $D = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$

Luas Penampang Jet, $a = \frac{\pi}{4} \cdot (0,1 \text{ m})^2 = 0,007854 \text{ m}^2$

Kecepatan Jet, $V = 20 \text{ m/s}$

a. Jika Plat tegak lurus terhadap Jet :

$$\begin{aligned} F &= \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \\ &= \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,007854 \text{ m}^2 \times (20 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \\ &= 320,24 \text{ kgf} \end{aligned}$$

b. Jika Sudut antara Plat dengan Jet sebesar $\theta = 45^\circ$:

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \cdot \sin \theta \\
 &= \frac{1000 \text{ kg/m}^3 \times 0,007854 \text{ m}^2 \times (20 \text{ m/s})^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \cdot \sin 45^\circ \\
 &= 226,45 \text{ kgf}
 \end{aligned}$$

Example 4 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 2,5 cm memberikan gaya 100 kgf dalam arah aliran terhadap suatu plat datar yang diposisikan miring dengan sudut 30° terhadap sumbu aliran. Tentukan laju aliran volume (debitnya) !

Jawab : Diameter jet, $D = 2,5 \text{ cm} = 0,025 \text{ m}$

$$\text{Luas Penampang Jet, } a = \frac{\pi}{4} \cdot (0,025 \text{ m})^2 = 0,0004909 \text{ m}^2$$

$$\text{Gaya pada arah aliran, } F_x = 100 \text{ kgf}$$

$$\text{Sudut antara plat \& jet, } \theta = 30^\circ$$

Gaya oleh jet pada arah aliran :

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \cdot \sin^2 \theta \\
 100 \text{ kgf} &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot (0,025 \text{ m})^2\right) \cdot V^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \cdot \sin^2 30^\circ
 \end{aligned}$$

$$V = 63,22 \text{ m/s}$$

Jadi debit aliran :

$$Q = a \cdot V = \left(\frac{\pi}{4} \cdot (0,025 \text{ m})^2\right) \cdot 63,22 \text{ m/s}$$

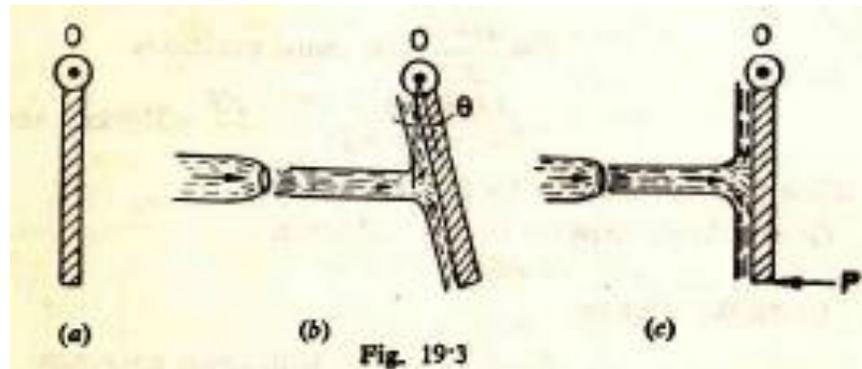
$$Q = 0,009878 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 9,878 \text{ liter/s}$$

1.4 Gaya dari Jet yang menumbuk Plat pada Engsel

Pada penjelasan sebelumnya, saat suatu semburan (jet) menumbuk suatu plat maka jet tersebut akan memberikan gaya pada plat tersebut.

Bagaimana efek dari gaya ini jika plat di-engsel ?



Gambar 1.3

Sebagai hasil tumbukan jet ini maka plat akan berayun terhadap engsel sebesar sudut θ . Sudut θ dapat ditentukan dengan mengambil momen dari gaya jet & berat plat tersebut.

Jika semburan (jet) air menumbuk plat pada bagian tengahnya maka sudut θ dapat ditentukan sbb :

Gaya yang diberikan jet :

$$F = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g}$$

Momen dari gaya jet terhadap engsel :

$$M_1 = F \cdot \frac{d}{2}$$

Dengan :

d = panjang plat

W = berat plat

Momen dari berat terhadap engsel:

$$M_2 = W \cdot \frac{d}{2} \cdot \sin \theta$$

Dengan menyamakan ke-2 momen tersebut, maka :

$$W \cdot \frac{d}{2} \cdot \sin \theta = F \cdot \frac{d}{2}$$

$$\sin \theta = \frac{F}{W}$$

Keterangan :

Untuk menahan supaya plat tetap dalam posisi vertikal maka gaya sebesar P harus diberikan pada ujung bawah plat (lihat gambar c).

Besarnya gaya P dapat ditentukan dengan mengambil momen dari gaya P terhadap engsel.

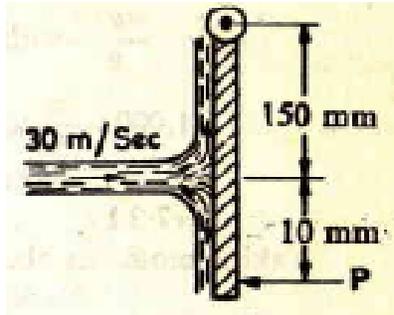
Example 5 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 25 mm menumbuk suatu plat datang secara tegak lurus dengan kecepatan 30 m/s pada suatu titik 150 mm di bawah engsel plat.

Berapa besar gaya (P) yang harus diberikan pada titik 100 mm di bawah sumbu jet supaya plat tetap pada posisi vertikal ?

Jawab :

Gaya yang diberikan jet :

$$F = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g}$$



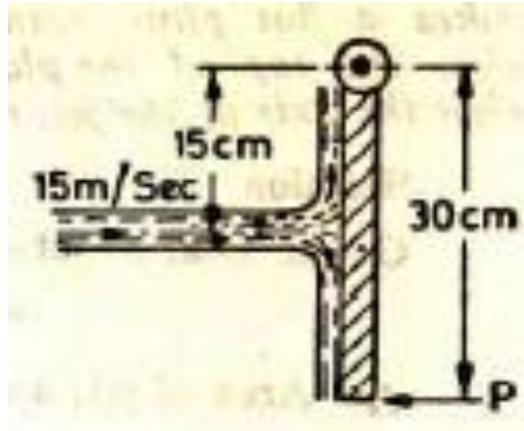
Gambar 1.4

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \\
 &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times \frac{\pi}{4} \cdot (0,025 \text{ m})^2 \times (30 \text{ m/s})^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \\
 &= 45,03 \text{ kgf}
 \end{aligned}$$

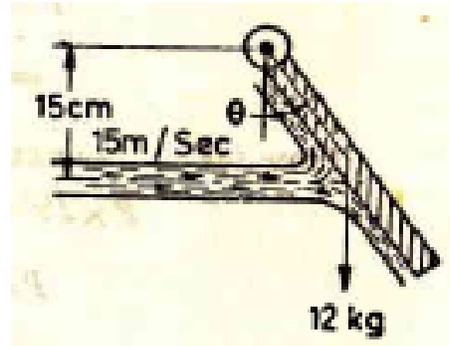
Momen dari gaya P : $P \times 250 \text{ mm} = 45,03 \text{ kgf} \times 150 \text{ mm}$
 $P = 27,018 \text{ kgf}$

Example 6 : Suatu plat bujur sangkar dengan berat 12 kgf & panjang dan lebar 30 cm x 30 cm tergantung pada suatu engsel. Suatu semburan (jet) air berdiameter 2 cm dalam arah horisontal dengan kecepatan 15 m/s menumbuk plat tersebut pada bagian tengahnya.

- a. Tentukan besarnya gaya yang harus diberikan di bagian bawah dari plat agar plat (P) tetap dalam posisi vertikal !
- b. Jika plat dibiarkan berayun bebas, tentukan sudut kemiringan θ !



Gambar 1.5



Gambar 1.6

Jawab :

Gaya yang diberikan jet :

$$F = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g}$$

$$F = \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g}$$

$$= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times \frac{\pi}{4} \cdot (0,02 \text{ m})^2 \times (15 \text{ m/s})^2}{9,81 \text{ m/s}^2} = 7,205 \text{ kgf}$$

Momen dari gaya P : $P \times 30 \text{ cm} = F \times 15 \text{ cm}$

$$P = \frac{7,205 \text{ kgf} \times 15 \text{ cm}}{30 \text{ cm}} = 3,6025 \text{ kgf}$$

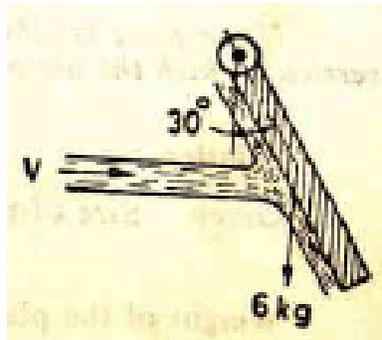
Sudut θ :

$$\sin \theta = \frac{F}{W} = \frac{7,205 \text{ kgf}}{12 \text{ kgf}} = 0,6$$

$$\theta = 36^\circ 53' 59,08'' = 36,9^\circ$$

Example 7 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 2 cm menumbuk suatu plat bujur sangkar yang mempunyai berat 6 kgf pada bagian tengahnya. Tentukan kecepatan jet supaya plat berayun dengan sudut 30° !

Jawab :



Gambar 1.7

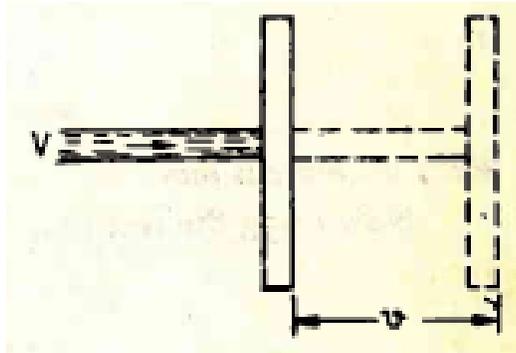
$$\sin \theta = \frac{F}{W}$$

$$\sin 30^\circ = \frac{\frac{w \cdot a \cdot V^2}{g}}{6 \text{ kgf}} = \frac{\left(\frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times \frac{\pi}{4} \cdot (0,02 \text{ m})^2 \times V^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \right)}{6 \text{ kgf}}$$

$$V = 9,68 \text{ m/s}$$

1.5 Gaya dari Jet yang menumbuk Plat yang Bergerak

Perhatikan suatu semburan (jet) air yang menumbuk suatu plat secara tegak lurus. Sebagai *hasil dari tumbukan jet maka plat bergerak dalam arah jet* (lihat gambar di bawah).



Gambar 1.8

Keterangan :

V = kecepatan jet [m/s]

a = luas penampang dari jet [m²]

v = kecepatan plat sebagai hasil dari tumbukan jet [m/s]

Sehingga : Kecepatan relatif jet terhadap plat sebesar = $(V - v)$

Untuk keperluan analisis \diamond diasumsikan bahwa :

- plat \rightarrow diam
- jet \rightarrow bergerak dengan kecepatan $(V - v)$

Ingat bahwa :

F = Massa fluida yg mengalir / detik x perubahan kecepatan

$$F = \frac{w \cdot a \cdot (V - v)}{g} \cdot [(V - v) - 0]$$

$$F = \frac{w \cdot a \cdot (V - v)^2}{g}$$

Kerja yang dilakukan jet / detik = Gaya x (Jarak tempuh plat / waktu)

$$\text{Kerja yang dilakukan jet / detik} = \frac{w \cdot a \cdot (V - v)}{g} \cdot v$$

Example 8 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 5 cm dengan kecepatan 20 m/s menumbuk secara tegak lurus suatu plat. Tentukan impact of jet (F) pada plat tersebut jika :

- Plat adalah diam
- Plat bergerak dengan kecepatan 7 m/s dalam arah jet
- Kerja yang dilakukan jet per detik

Jawab : Diameter jet, $D = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$

$$\text{Luas Penampang Jet, } a = \frac{\pi}{4} \cdot (0,05 \text{ m})^2 = 0,00196 \text{ m}^2$$

$$\text{Kecepatan Jet, } V = 20 \text{ m/s}$$

$$\text{Kecepatan Plat, } v = 7 \text{ m/s}$$

a. Jika plat tetap diam :

$$\begin{aligned} F &= \frac{w \cdot a \cdot V^2}{g} \\ &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,00196 \text{ m}^2 \times (20 \text{ m/s})^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 79,92 \text{ kgf} \end{aligned}$$

b. Jika plat bergerak :

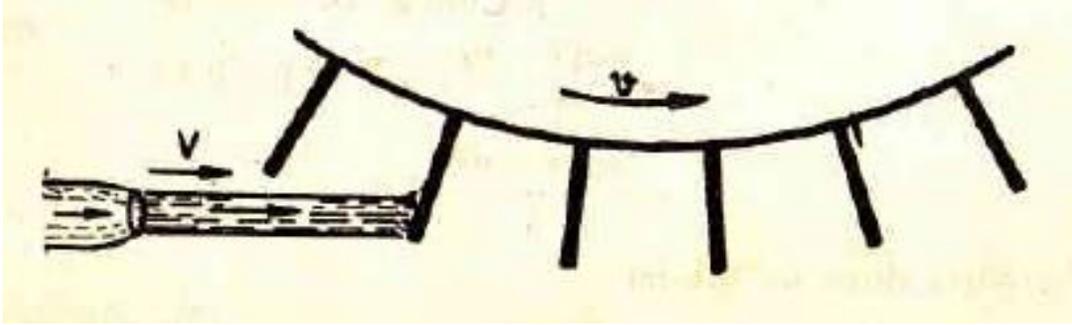
$$\begin{aligned} F &= \frac{w \cdot a \cdot (V - v)^2}{g} \\ &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,00196 \text{ m}^2 \times (20 \text{ m/s} - 7 \text{ m/s})^2}{9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 33,77 \text{ kgf} \end{aligned}$$

c. Kerja yang dilakukan jet / detik :

$$\dot{W}_{jet} = F \cdot v = 33,77 \text{ kgf} \times 7 \text{ m/s} = 236,39 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$$

1.6 Gaya dari Jet yang menumbuk Rangkaian Sudu yang Bergerak

Perhatikan suatu semburan (jet) air yang menumbuk rangkaian sudu yang terpasang di bagian keliling suatu roda (lihat gambar).



Gambar 1.9

Keterangan :

V = kecepatan semburan (jet) [m/s]

a = Luas penampang jet [m²]

v = kecepatan sudu sebagai hasil tumbukan jet [m/s]

Gaya yang diberikan jet :

F = Massa fluida yg mengalir / detik x perubahan kecepatan

Kerja yang dilakukan jet / detik = Gaya x (Jarak tempuh plat / waktu)

$$\text{Kerja yang dilakukan jet / detik} = \frac{w \cdot a \cdot V \cdot (V - v)}{g} \cdot v$$

Kerja yang dilakukan jet per kgf air :

$$\text{Kerja yang dilakukan jet per kgf air} = \frac{1}{g} \cdot (V - v) \cdot v$$

Energi jet per kgf (berat) air :

$$\text{Energi jet per kgf (berat) air} = \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi } (\eta) : \quad \eta &= \frac{\text{Kerja jet per kgf air}}{\text{Energi jet per kgf air}} \\ &= \frac{\frac{1}{g} \cdot (V - v) \cdot v}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} = \frac{2 \cdot (V - v) \cdot v}{V^2} \end{aligned}$$

Atau :

$$\eta = \frac{\text{Kerja yang dilakukan jet}}{\text{Energi jet}}$$

Example 9 : Suatu semburan (jet) berdiameter 5 cm bergerak dengan kecepatan 15 m/s menumbuk serangkaian sudu yang bergerak dengan kecepatan 6 m/s.

Tentukan :

- Gaya yang diberikan oleh jet
- Kerja yang dilakukan jet / detik
- Efisiensi semburan (jet)

Jawab :

$$\begin{aligned} \text{Diameter Jet,} \quad D &= 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m} \\ \text{Luas Penampang Jet,} \quad a &= \frac{\pi}{4} \cdot (0,05 \text{ m})^2 = 0,00196 \text{ m}^2 \\ \text{Kecepatan Jet,} \quad V &= 15 \text{ m/s} \\ \text{Kecepatan Sudu,} \quad v &= 6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

a. Gaya yang diberikan jet :

$$F = \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V - v)$$

$$\begin{aligned} F &= \frac{w \cdot a \cdot V \cdot (V - v)}{g} \\ &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,00196 \text{ m}^2 \times 15 \text{ m/s} \times (15 \text{ m/s} - 6 \text{ m/s})}{9,81 \text{ m/s}^2} = 26,97 \text{ kgf} \end{aligned}$$

b. Kerja yang dilakukan jet / detik = Gaya x (Jarak tempuh plat / waktu)

$$\dot{W}_{jet} = F \cdot v = 26,97 \text{ kgf} \times 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 161,82 \text{ kgf} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

c. Efisiensi (η) :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{2 \cdot (V - v) \cdot v}{V^2} \\ &= \frac{2 \cdot (15 - 6) \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\left(15 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} \\ &= 0,48 = 48 \% \end{aligned}$$

Example 10 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 5 cm bergerak dengan kecepatan 20 m/s menumbuk suatu sudu datar yang tegak lurus terhadap arah aliran. Tentukan :

- Gaya yang diberikan Jet jika sudu bergerak dengan kecepatan 8 m/s
- Gaya yang diberikan Jet jika satu sudu datar diganti dengan serangkaian baris sudu

Jawab : Diameter Jet, $D = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$

Luas Penampang Jet, $a = \frac{\pi}{4} \cdot (0,05 \text{ m})^2 = 0,00196 \text{ m}^2$

Kecepatan Jet, $V = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

a. Jika satu sudu bergerak : Kecepatan Sudu, $v = 8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$\begin{aligned} F &= \frac{w \cdot a \cdot (V - v)^2}{g} \\ &= \frac{1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \times 0,00196 \text{ m}^2 \times \left(20 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \\ &= 28,77 \text{ kgf} \end{aligned}$$

b. Jika serangkaian sudu bergerak :

$$\begin{aligned} F &= \frac{w \cdot a \cdot V \cdot (V - v)}{g} \\ &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,00196 \text{ m}^2 \times 20 \text{ m/s} \times (20 \text{ m/s} - 8 \text{ m/s})}{9,81 \text{ m/s}^2} \\ &= 47,95 \text{ kgf} \end{aligned}$$

Tutorial

1. Suatu jet air berdiameter 5 cm bergerak dengan kecepatan 10 m/s menumbuk suatu plat datar yang diam secara tegak lurus. Hitung gaya yang diberikan jet pada plat !

[Jawab : 20 kgf]

2. Suatu jet air horisontal berdiameter 3 cm menumbuk suatu plat diam vertikal dengan kecepatan 20 m/s. Tentukan gaya yang diberikan oleh jet !

[Jawab : 28,8 kgf]

3. Suatu jet air horisontal berdiameter 10 cm bergerak dengan kecepatan 15 m/s menumbuk suatu plat diam vertikal. Hitung gaya yang diberikan jet pada plat !

[Jawab : 180 kgf]

4. Suatu jet air berdiameter 10 cm menumbuk suatu plat dengan kecepatan 30 m/s. Tentukan gaya yang diberikan jet jika plat miring sebesar 30° terhadap arah jet !

[Jawab : 360 kgf]

5. Suatu jet air berdiameter 7,5 cm bergerak dengan kecepatan 12 m/s menumbuk bagian tengah suatu plat vertikal yang diengsel di bagian atas. Tentukan gaya yang harus diberikan di bagian bawah plat supaya plat tetap pada posisi vertikal !

[Jawab : 16,2 kgf]

6. Suatu jet air horisontal berdiameter 2,5 cm menumbuk suatu plat vertikal yang diengsel di bagian atasnya dengan kecepatan 12 m/s. Tentukan gaya yang harus diberikan di bagian bawah plat untuk menjaga plat tetap pada posisi vertikal !

Jika plat dibiarkan berayun bebas, tentukan sudut kemiringannya. Asumsikan berat plat sebesar 18 kgf !

[Jawab : 7,2 kg; $23^\circ 35'$]

7. Suatu jet air berdiameter 5 cm menumbuk suatu plat bujur sangkar pada bagian tengahnya. Plat sebesar 10 kgf diengsel di bagian atasnya. Tentukan kecepatan jet sehingga plat membentuk sudut kemiringan 30° terhadap arah vertikal !

[Jawab : 5,37 m/s]

8. Suatu jet air berdiameter 25 cm bergerak dengan kecepatan 30 m/s. Tentukan gaya yang diberikan oleh jet, jika :

a. Plat diam [Jawab : 45 kgf]

b. Plat bergerak dengan kecepatan 12 m/s [Jawab : 16,22 kgf]

9. Suatu jet air berdiameter 5 cm dengan kecepatan 33 m/s menumbuk suatu plat sehingga plat bergerak dengan kecepatan 9 m/s dalam arah jet. Tentukan gaya yang diberikan oleh jet !

Jika plat diganti dengan serangkaian baris sudu yang bergerak dengan kecepatan yang sama, tentukan gaya yang diberikan jet pada sudu-sudu tersebut !

[Jawab : 115 kg; 158 kgf]

10. Suatu jet air berdiameter 10 cm bergerak dengan kecepatan 12 m/s menumbuk serangkaian baris sudu sehingga sudu bergerak dengan kecepatan 8 m/s. Tentukan :

a. Gaya pada plat

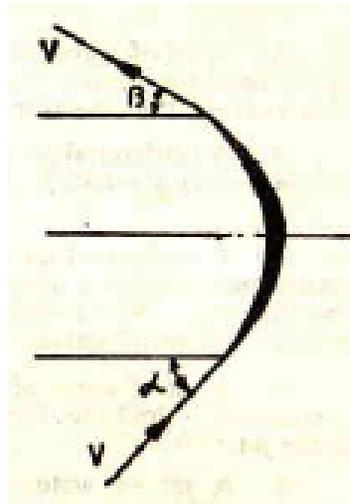
b. Kerja yang dilakukan jet / detik

c. Efisiensi Jet

[Jawab : 38,4 kgf; 307,2 kgf.m; 44,4%]

1.7 Gaya dari Jet yang menumbuk Sudu Lengkung yang Diam

Perhatikan suatu jet air yang masuk & keluar suatu sudu lengkung yang diam secara tangensial berikut.



Gambar 1.10

Keterangan :

- V = kecepatan jet
- a = luas penampang jet
- α = sudut masuk jet
- β = sudut keluar jet

Semburan (jet) saat melalui sudu akan memberikan gaya pada sudu. Gaya ini dapat ditentukan dengan menentukan komponen-komponen gaya sepanjang arah normal & arah tangensial terhadap sudu.

Sudah kita ketahui bahwa :

Gaya jet sepanjang arah normal terhadap sudu adalah :

$$F_n = \text{Laju Aliran Massa} \times \text{Perubahan Kecepatan Arah Normal Sudu}$$

$$F_n = \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V \cdot \cos \alpha + V \cdot \cos \beta)$$

dan :

Gaya dari Jet arah tangensial terhadap sudu adalah :

$$F_t = \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V \cdot \sin \alpha - V \cdot \sin \beta)$$

Example 11 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 4 cm masuk suatu sudu lengkung yang diam dengan kecepatan 50 m/s pada sudut 20° terhadap arah horisontal. Tentukan gaya normal & gaya tangensial yang disebabkan jet jika fluida keluar sudu pada sudut 15° terhadap arah horisontal.

Jawab :

$$\text{Diameter jet air} \quad D = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas Penampang jet,} \quad a &= 0,25 \pi \cdot (0,04 \text{ m})^2 \\ &= 0,001257 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Kecepatan jet} \quad V = 50 \text{ m/s}$$

$$\text{Sudut inlet jet} \quad \alpha = 20^\circ$$

$$\text{Sudut outlet jet} \quad \beta = 15^\circ$$

F_n = gaya yang diberikan oleh jet dalam arah normal sudu

Gaya Normal :

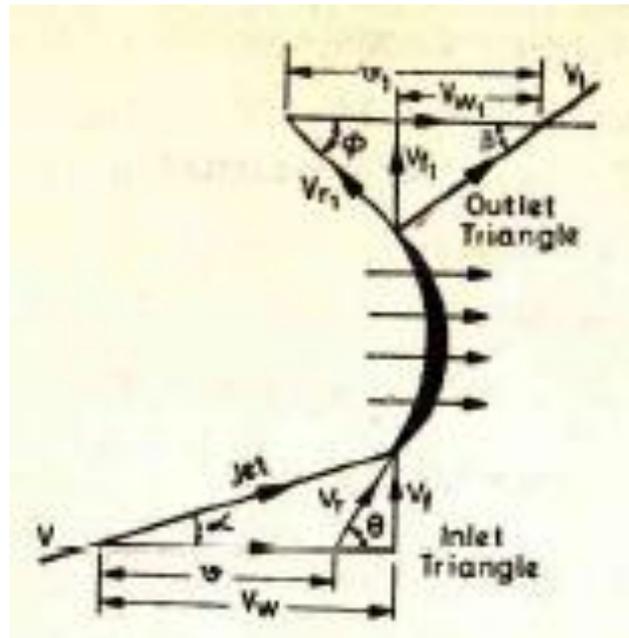
$$\begin{aligned} F_n &= \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V \cdot \cos \alpha + V \cdot \cos \beta) \\ &= \frac{1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \times 0,0012567 \text{ m}^2 \times 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cdot \left(50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \cos 20^\circ + 50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \cos 15^\circ \right) \\ &= 610,29 \text{ kgf} \end{aligned}$$

Gaya Tangensial :

$$\begin{aligned}
 F_t &= \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V \cdot \sin \alpha - V \cdot \sin \beta) \\
 &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,0012567 \text{ m}^2 \times 50 \text{ m/s}}{9,81 \text{ m/s}^2} \cdot (50 \text{ m/s} \cdot \sin 20^\circ - 50 \text{ m/s} \cdot \sin 15^\circ) \\
 &= 26,65 \text{ kgf}
 \end{aligned}$$

1.8 Gaya dari Jet yang menumbuk Sudu Lengkung yang Bergerak

Perhatikan suatu semburan (jet) air yang masuk & keluar suatu sudu lengkung yang bergerak.



Gambar 1.11

Keterangan :

- V = kecepatan jet masuk sudu
- V₁ = kecepatan jet keluar sudu
- v, v₁ = kecepatan sudu (inlet & outlet)
- α = sudut jet masuk ke sudu
- β = sudut jet keluar dari sudu

- V_r = kecepatan relatif jet & sudu pada sisi masuk sudu
 (beda vektor V & v)
- V_{r1} = kecepatan relatif jet & sudu pada sisi keluar sudu
 (beda vektor V_1 & v_1)
- θ = sudut sudu pada sisi masuk
- ϕ = sudut sudu pada sisi keluar
- V_w = komponen horisontal dari V (sejajar dengan arah gerak sudu,
 dikenal sebagai kecepatan whirl pada sisi masuk)
 $= V \cdot \cos \alpha$
- V_{w1} = komponen horisontal dari V_1 (sejajar dengan arah gerak sudu,
 dikenal dengan kecepatan whirl pada outlet)
 $= V_1 \cdot \cos \beta$
- V_f = komponen vertikal dari V (tegak lurus terhadap arah gerak sudu,
 dikenal dengan kecepatan aliran pada inlet)
 $= V \cdot \sin \alpha$
- V_{f1} = komponen vertikal dari V_1 (tegak lurus terhadap arah gerak sudu,
 dikenal dengan kecepatan aliran pada outlet)
 $= V_1 \cdot \sin \beta$
- a = luas penampang lintang dari semburan (jet)

Hubungan antara segitiga sudut inlet & outlet adalah :

$$v = v_1$$

$$V_r = V_{r1}$$

Gaya jet dalam arah gerak sudu (F_x) :

$F_x = \text{Laju Aliran Massa Fluida} \times \text{Perubahan Kecepatan Whirl}$

$$F_x = \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V_w - V_{w,1})$$

Daya yang dilakukan dalam arah gerak sudu adalah :

$$W/t = \text{Gaya} \times (\text{Jarak}/t)$$

$$\frac{W}{t} = \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V_w - V_{w,l}) \cdot v$$

Kerja yang dilakukan dalam arah gerak sudu per satuan berat adalah :

$$\frac{W}{\text{kgf}} = \frac{1}{g} \cdot (V_w - V_{w,l}) \cdot v$$

Example 12 : Suatu semburan (jet) air yang bergerak dengan kecepatan 60 m/s mengenai sudu dengan sudut $\alpha = 30^\circ$ sehingga sudu bergerak dengan kecepatan 25 m/s. Air keluar dari sudu secara normal (tegak lurus) terhadap arah gerak sudu.

Gambarkan segitiga kecepatan sisi masuk & sisi keluar dan tentukan sudut sudu ! Ambil kecepatan relatif pada sisi keluar 0,85 dari kecepatan relatif pada sisi masuk.

Jawab :

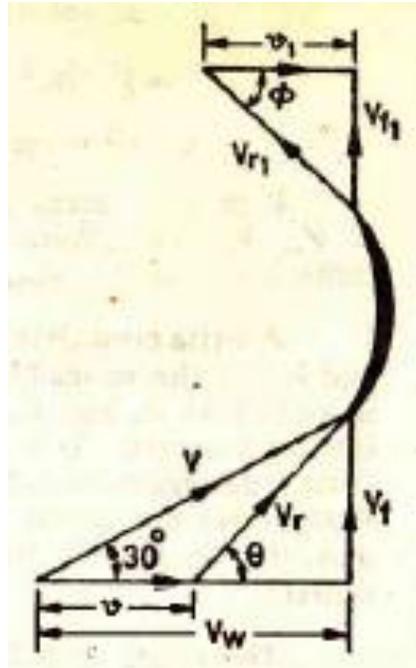
Kecepatan jet $V = 60 \text{ m/s}$

Kecepatan sudu $v = 25 \text{ m/s}$

Sudut jet masuk $\alpha = 30^\circ$

Kecepatan relatif jet & sudu pada sisi outlet

$$V_{r1} = 0,85 \cdot V_r$$



Gambar 1.12

Langkah-Langkah Penggambaran Segitiga Kecepatan :

1. Gambar kecepatan sudu $v = 25 \text{ m/s}$ dalam arah horisontal
2. Gambar kecepatan jet $V = 60 \text{ m/s}$ dengan membentuk sudut $\alpha = 30^\circ$
3. Gambar kecepatan V_r (arah tangensial terhadap ujung sudu masuk)
4. Gambar kecepatan V_f dan V_w
5. Gambar bentuk sudu lengkungnya
6. Hitung V_{r1} (diketahui $V_{r1} = 0,85 \cdot V_r = 0,85 \times 40,42 = 34,357 \text{ m/s}$)
7. Gambar V_{r1} dengan arah tangensial terhadap ujung sudu keluar
8. Gambar v_1 ($v_1 = v = 25 \text{ m/s}$)
9. Gambar V_{f1} (diketahui tegak lurus terhadap arah gerak sudu).

Keterangan : dalam hal ini $V_1 = V_{f1}$

Pada segitiga kecepatan sisi keluar :

$$\cos \phi = \frac{v_1}{V_{r,1}} = \frac{25 \text{ m/s}}{34,28 \text{ m/s}} = 0,7293$$

$$\phi = 43,17^\circ$$

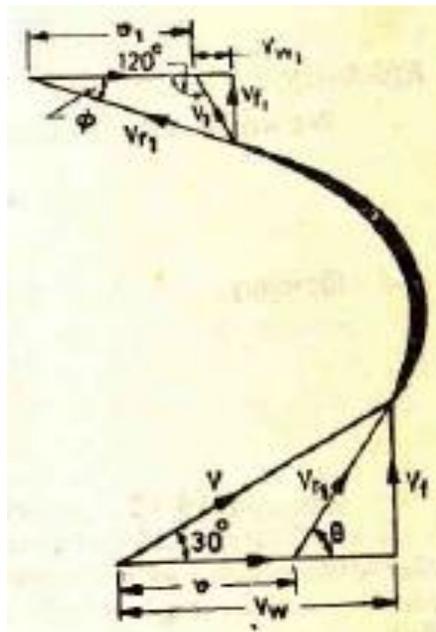
Example 13 : Suatu semburan (jet) air yang berkecepatan 30 m/s menumbuk serangkaian sudu sehingga sudu bergerak dengan kecepatan 15 m/s. Jet membuat sudut 30° terhadap arah gerak sudu saat masuk sudu & keluar pada sudut 120° terhadap arah gerak sudu.

Gambarkan segitiga kecepatan pada sisi masuk & keluar & tentukan :

- Sudut dari ujung sudu sehingga air masuk & keluar tanpa shock
- Kerja yang dilakukan per satuan massa air yang masuk sudu
- Efisiensi

Jawab :

- Kecepatan jet $V = 30 \text{ m/s}$
 Kecepatan sudu $v = 15 \text{ m/s}$
 Sudut jet masuk $\alpha = 30^\circ$
 Sudut jet keluar $\beta = 120^\circ$
 Sudut sudu θ dan $\phi = \dots ?$



Gambar 1.13

Kecepatan Whirl pada sisi masuk :

$$V_w = V \cdot \cos 30^\circ = 30 \text{ m/s} \times \cos 30^\circ = 25,98 \text{ m/s}$$

Kecepatan Aliran pada sisi masuk (V_f) :

$$V_f = V \cdot \sin 30^\circ = 30 \text{ m/s} \times 0,5 = 15 \text{ m/s}$$

$$\tan \theta = \frac{V_f}{V_w - v} = \frac{15}{25,98 - 15} = 1,366$$

$$\theta = 53^\circ 47' 45,14'' = 53,8^\circ$$

Pada segitiga kecepatan sisi masuk, kecepatan relatif jet & sudu :

$$V_r = \frac{V_f}{\sin(53,8^\circ)} = \frac{15 \text{ m/s}}{0,8070} = 18,59 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan sisi keluar, dengan aturan sinus maka :

$$\frac{v_1}{\sin(60^\circ - \phi)} = \frac{V_{r,1}}{\sin 120^\circ}$$

$$\sin(60^\circ - \phi) = \frac{v_1 \cdot \sin 120^\circ}{V_{r,1}} = \frac{15 \cdot \sin 120^\circ}{18,59} = 0,6988$$

$$(60^\circ - \phi) = 44,33^\circ$$

$$\phi = 15,67^\circ$$

Kerja yang dilakukan per satuan berat air yang masuk sudu :

Dari segitiga kecepatan pada sisi keluar, kecepatan whirl pada sisi keluar :

$$\begin{aligned} V_{w,1} &= V_{r,1} \cdot \cos(15,67^\circ) - v_1 \\ &= (18,59 \text{ m/s} \times 0,9636) - 15 \text{ m/s} = 2,899 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$$\text{Sehingga : } \frac{W}{\text{kgf}} = \frac{1}{g} \cdot (V_w - V_{w,1}) \cdot v$$

$$= \frac{1}{9,81 \text{ m/s}^2} \cdot (25,98 \text{ m/s} - 2,899 \text{ m/s}) \times 15 \text{ m/s} = 35,29 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Efisiensi :

$$\text{Energi jet per satuan massa air : } = \frac{V^2}{2 \cdot g} = \frac{(30 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 45,87 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

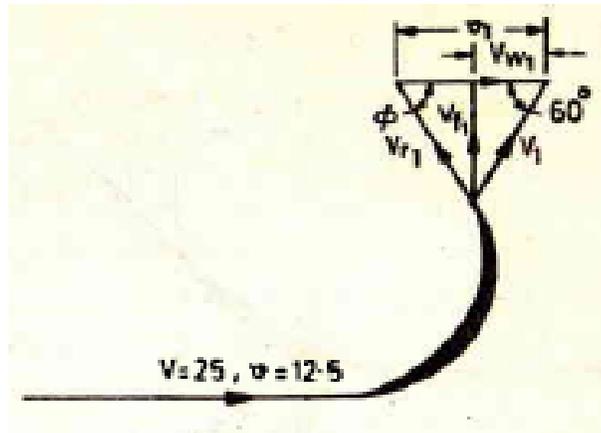
$$\text{Sehingga : } \eta = \frac{\text{Kerja yang dilakukan} / \text{massa air}}{\text{Energi Jet} / \text{massa air}} = \frac{35,29 \text{ kgf} \cdot \text{m}}{45,87 \text{ kgf} \cdot \text{m}} = 76,93 \%$$

Example 14 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 10 cm yang bergerak dengan kecepatan 25 m/s dalam arah gerak sudu, masuk sudu sehingga sudu bergerak dengan kecepatan 12,5 m/s. Jika jet air keluar sudu dengan sudut 60° terhadap arah gerak sudu, tentukan :

- Gaya pada sudu dalam arah geraknya
- Kerja yang dilakukan per detik

Jawab :

| | |
|---------------------|--|
| Diameter jet | $D = 10 \text{ cm}$ |
| Luas penampang jet, | $a = 0,25 \pi \cdot (0,1 \text{ m})^2$ $= 0,007854 \text{ m}^2$ |
| Kecepatan jet | $V = 25 \text{ m/s}$ |
| Kecepatan sudu | $v = 12,5 \text{ m/s}$ |
| Sudut jet masuk | $\alpha = 0^\circ$ |
| Sudut jet keluar | $\beta = 60^\circ$ |



Gambar 1.14

Gaya pada sudu dalam arah gerakanya :

Karena semburan (jet) air bergerak dalam arah yg sama dengan arah sudu, maka segitiga kecepatan pada sisi masuk berupa garis lurus (lihat gambar di atas).

Sehingga :

- Kecepatan Whirl pada sisi masuk $\rightarrow V_w = 25 \text{ m/s}$
- Kecepatan relatif jet & sudu $\rightarrow V_r = V - v = 25 - 12,5 = 12,5 \text{ m/s}$

Karena kecepatan sudu pada sisi outlet (v_1) & kecepatan relatif jet & sudu pada outlet (V_{r1}) adalah sama ($v_1 = V_{r1}$) & jet keluar sudu pada sudut 60° , maka segitiga kecepatan pada sisi outlet berupa segitiga sama sisi.

Dari segitiga kecepatan sisi outlet didapat :

$$\text{Kecepatan Whirl outlet} = V_{w1} = 6,25 \text{ m/s}$$

Sehingga : Gaya pada sudu dalam arah gerakanya :

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V_w - V_{w1}) \\
 &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,007854 \text{ m}^2 \times 25 \text{ m/s}}{9,81 \text{ m/s}^2} (25 \text{ m/s} - 6,25 \text{ m/s}) = 375,29 \text{ kgf}
 \end{aligned}$$

Kerja yang dilakukan per detik :

$$\begin{aligned} \frac{W}{t} &= \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V_w - V_{w1}) \cdot v \\ &= \frac{1000 \text{ kgf/m}^3 \times 0,007854 \text{ m}^2 \times 25 \text{ m/s}}{9,81 \text{ m/s}^2} (25 \text{ m/s} - 6,25 \text{ m/s}) \cdot 12,5 \text{ m/s} \\ &= 4.691,08 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

Example 15 : Suatu semburan (jet) circular air bergerak dengan laju aliran 60 liter/s & kecepatan 24 m/s. Jet air tersebut menumbuk secara tangensial suatu sudu yang bergerak pada arah gerak jet dengan kecepatan sudu 12 m/s. Sudu dibuat sedemikian rupa sehingga akan mengeluarkan fluida pada sudut 45° (sudut sudu keluar).

Tentukan sudut β & kerja yang dilakukan per detik !

Jawab :

Debit aliran $Q = 60 \text{ liter/s}$

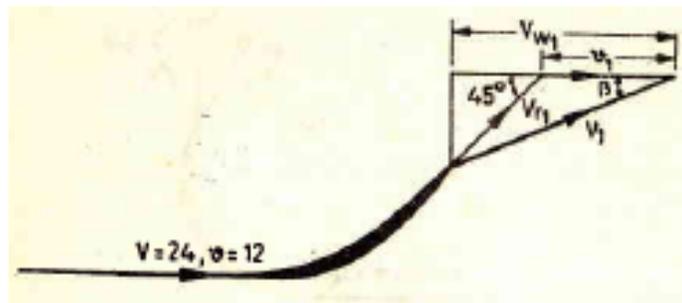
Laju aliran massa $= w \cdot a \cdot V = 60 \text{ kg/s}$

Kecepatan jet $V = 24 \text{ m/s}$

Kecepatan sudu $v = 12 \text{ m/s}$

Sudut jet masuk $\alpha = 0^\circ$

Sudut sudu keluar $\phi = 45^\circ$



Gambar 1.15

Sudut β = sudut di mana jet / semburan didefleksi

Karena jet air bergerak pada arah yg sama dengan arah gerak sudu, maka segitiga kecepatan inlet berupa garis lurus.

Sehingga :

- Kecepatan Whirl pada sisi inlet $\rightarrow V_w = 24 \text{ m/s}$
- Kecepatan relatif sisi inlet $\rightarrow V_r = V - v = 24 - 12 = 12 \text{ m/s}$

Karena kecepatan sudu pada outlet (v_1) & kecepatan relatif pada outlet (V_{r1}) adalah sama ($v_1 = V_{r1} = 12 \text{ m/s}$), maka segitiga kecepatan outlet adalah segitiga sama kaki (lihat gambar)

Sehingga : Sudut β :

$$\beta = \frac{\phi}{2} = \frac{45^\circ}{2} = 22,5^\circ$$

Kerja yang dilakukan per detik :

Dari segitiga kecepatan outlet, maka kecepatan whirl pada outlet :

$$\begin{aligned} V_{w1} &= 12 + 12 \cdot \cos 45^\circ = 12 + 12 \times 0,707 \\ &= 20,5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sehingga :

$$\begin{aligned} W &= \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V_w - V_{w1}) \cdot v \\ &= \frac{60 \text{ kg/s}}{9,81 \text{ m/s}^2} (24 \text{ m/s} - 20,5 \text{ m/s}) \times 12 \text{ m/s} \\ &= 256,88 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

Example 16 : Suatu semburan (jet) air berdiameter 5 cm menumbuk suatu sudu lengkung sehingga air keluar sudu terdefleksi dengan sudut 170° . Sudu bergerak dalam arah yang sama dengan arah jet air dengan kecepatan yg sama sebesar 50 m/s. Jika laju aliran air sebesar 0,3 m³/s & dgn mengabaikan gesekan, tentukan :

- Komponen gaya pada sudu dalam arah gerak
- HP yang dihasilkan oleh sudu
- Efisiensi

Jawab :

Diameter Jet $D = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$

Luas penampang jet, $a = 0,25 \cdot \pi \cdot (0,05 \text{ m})^2 = 0,00196 \text{ m}^2$

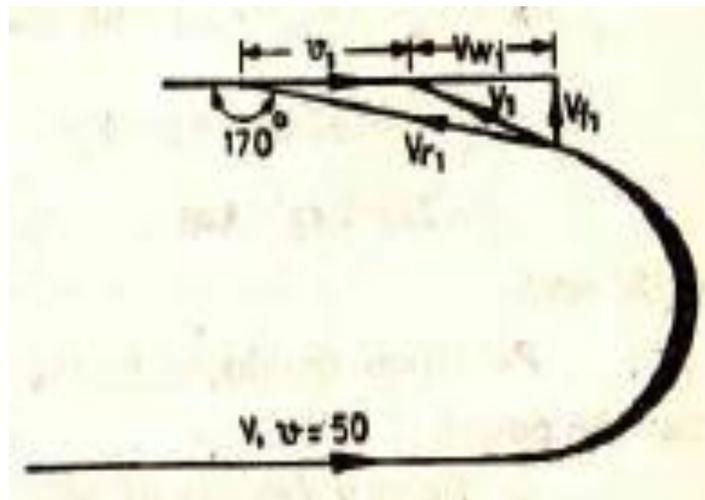
Kecepatan sudu $v = 50 \text{ m/s}$

Debit aliran $Q = 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$

Laju aliran massa (w.a.V) = 300 kg/s

Sudut jet masuk $\alpha = 0^\circ$

Sudut sudu keluar $\phi = 170^\circ$



Gambar 1.16

Komponen gaya pada sudu dalam arah gerak (F_x) :

Kecepatan jet (V) :

$$V = \frac{Q}{a} = \frac{0,3 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00196 \text{ m}^2} = 153,06 \text{ m/s}$$

Karena semburan (jet) air bergerak dalam arah yg sama dengan sudu, maka segitiga kecepatan inlet berupa garis lurus

Sehingga :

- Kecepatan whirl inlet $\rightarrow V_w = 153,06 \text{ m/s}$
- Kecepatan relatif $\rightarrow V_r = V_w - v = 153,06 - 50 = 103,06 \text{ m/s}$

Dari segitiga kecepatan outlet, maka kecepatan whirl outlet :

$$\begin{aligned} V_{w,1} &= V_{r,1} \cdot \cos 10^\circ - v \\ &= 103,06 \text{ m/s} \times 0,9848 - 50 \text{ m/s} \\ &= 51,5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sehingga : Komponen gaya pada sudu dalam arah gerak (F_x) :

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{w \cdot a \cdot V}{g} \cdot (V_w + V_{w,1}) \\ &= \frac{300 \text{ kg/s}}{9,81 \text{ m/s}^2} \cdot (153,06 \text{ m/s} + 51,5 \text{ m/s}) \\ &= 6.255,66 \text{ kgf} \end{aligned}$$

HP (Horse Power) yang dihasilkan oleh sudu (P) :

$$\begin{aligned} P &= \frac{\text{Gaya [kgf]} \times \text{Kecepatan Sudu [m/s]}}{75} \\ &= \frac{6.255,66 \text{ kgf} \times 50 \text{ m/s}}{75} = 4.170,44 \text{ HP} \times \frac{1 \text{ kW}}{1,341 \text{ HP}} = 3.109,95 \text{ kW} \end{aligned}$$

Efisiensi :

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\text{HP yang dihasilkan sudu}}{\text{Energi Kinetik Jet}} = \frac{3.109,95 \text{ kW}}{(w \cdot a \cdot V) \cdot \left(\frac{V^2}{2 \cdot g}\right)} \\ &= \frac{3.109,95 \text{ kW}}{300 \text{ kg/s} \times \left(\frac{(153,06 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,81 \text{ m/s}^2}\right)} = \frac{3.109,95 \text{ kW}}{3.514.104,54 \text{ W}} \\ &= 88,5 \%\end{aligned}$$

Tutorial

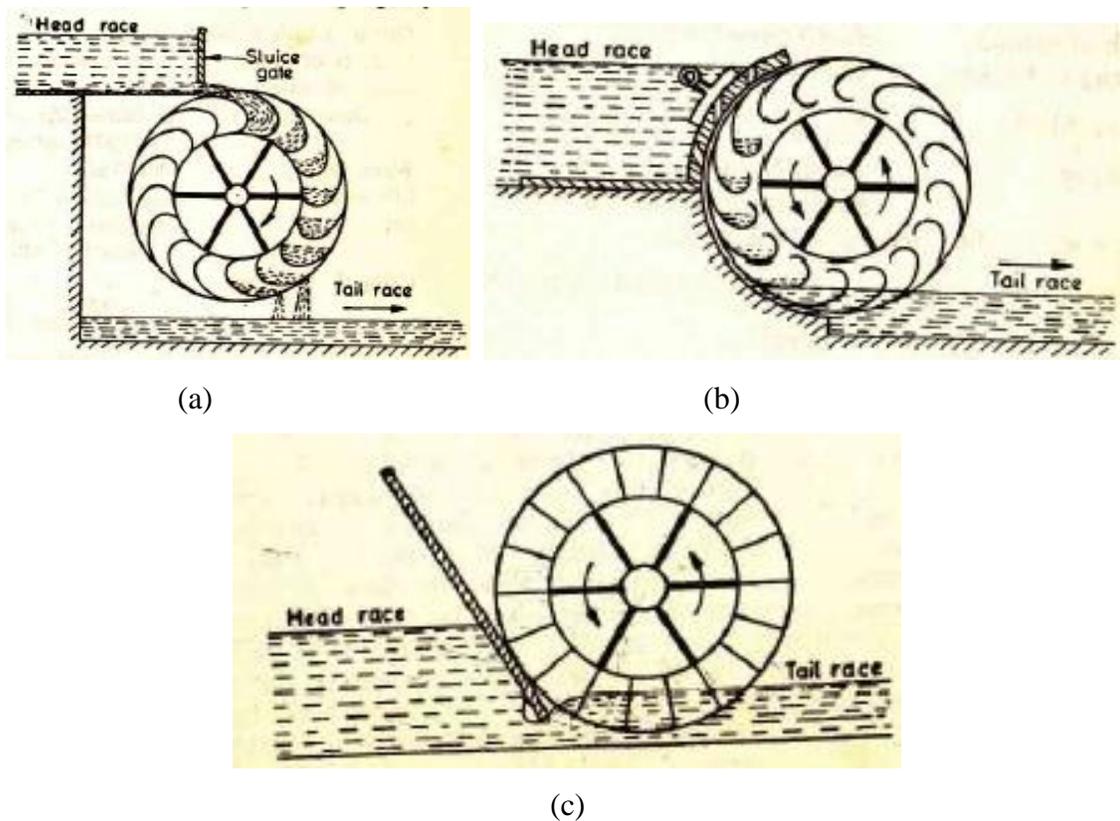
1. Suatu semburan (jet) air berdiameter 5 cm masuk suatu sudu lengkung yang diam dengan kecepatan 30 m/s pada sudut 30° terhadap arah horisontal. Tentukan gaya normal & gaya tangensial jika jet air keluar sudu pada sudut 20° terhadap arah horisontal !
2. Suatu jet air yang bergerak dengan kecepatan 60 m/s menumbuk suatu rangkaian sudu lengkung pada sudut 30° & keluar sudu pada sudut 160° . Jika sudu bergerak dengan kecepatan 30 m/s, tentukan :
 - a. Kerja yang dilakukan sudu per kg air
 - b. Sudut sudu pada sisi inlet & sisi outlet
3. Suatu jet air yang mempunyai kecepatan 35 m/s menumbuk serangkaian sudu lengkung yang bergerak dengan kecepatan 20 m/s. Jet air membuat sudut 120° . Gambarkan segitiga kecepatan pada sisi inlet & outlet dan tentukan :
 - a. Sudut sudu pada sisi inlet & outlet
 - b. Kerja yang dilakukan per kg air
4. Suatu jet air yang bergerak dengan kecepatan 60 m/s menumbuk suatu rangkaian sudu yang bergerak dengan kecepatan 30 m/s. Jet air membuat sudut antara kecepatan relatif sebesar 120° . Jika rasio kecepatan relatif outlet & inlet sebesar 0,9, tentukan :
 - a. Sudut sudu pada sisi inlet
 - b. Kerja yang dilakukan per kg air
 - c. Efisiensi

2. Water Wheels

2.1 Jenis-Jenis Water Wheels

Kincir Air (Water Wheel) secara luas diklasifikasikan menjadi 3 kelompok berdasarkan tenaga penggerak (*driving action*) dari air, yaitu :

1. Kincir yang digerakkan dengan berat air yg disuplai
2. Kincir yang digerakkan sebagian dengan berat air & sebagian dengan impuls dari air
3. Kincir yang digerakkan seluruhnya dengan impuls dari air



Gambar 2.1

Secara praktis, kincir air terdiri dari *central hub* dan *circular wheel* yang mempunyai sejumlah bucket atau sudu yg diletakkan pada keliling wheel.

Air dialirkan ke *wheel* pada beberapa titik / lokasi pada kelilingnya yang akan mengisi *bucket* atau menumbuk sudu.

Berikut adalah tipe-tipe wheel yang sudah sering digunakan :

1. Overshot Wheel
2. Breast Wheel
3. Undershot Wheel

2.2 Overshot Water Wheel

Overshot Wheel (sesuai dengan namanya) yaitu air masuk bucket pada bagian atas dari wheel (lihat gambar). Wheel akan berputar seluruhnya karena berat air (kadang-kadang sebagian oleh gaya impuls dari air). Air (dari head race) masuk ke bucket melalui suatu adjustable sluice gate. Berat dari air memberikan gaya ke bucket turun sehingga bucket akan berputar. Bucket akan kosong pada sisi tail race (saat mendekati posisi terbawah).

Bucket diatur sedemikian rupa sehingga energi maksimum air dimanfaatkan. Kadang-kadang crown dari wheel dibuat sedikit di bawah head race sehingga air menumbuk bucket dengan sedikit kecepatan awal. Dalam kasus ini, wheel digerakkan sebagian oleh berat air & sebagian oleh gaya impuls air.

Overshot Wheel mempunyai detail konstruksi sbb :

- Head Air $H = 10 - 25 \text{ m}$
- Diameter Wheel $D = 3 - 20 \text{ m}$
- Jumlah Bucket $= 8 - 10 D$
- Kecepatan Wheel $N = 4 - 8 \text{ rpm}$
- Kedalaman Shroud $= 50 - 100 \text{ cm}$
- Efisiensi $\eta = 60 - 80 \%$

Daya yang diproduksi oleh Overshot Wheel :

$$P = \eta \cdot \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

Keterangan :

d = kedalaman shroud ($r_2 - r_1$)

b = kedalaman bucket

k = fraksi bucket yang terisi oleh air

ω = kecepatan sudut dari wheel [rad/s]

N = kecepatan sudut wheel [rpm]

v = kecepatan bucket

w = berat jenis air [1000 kgf/m³]

Q = debit [m³/s]

H = head [m]

P = daya [HP]

v = kecepatan bucket

$$v = \omega \cdot r = \frac{\omega \cdot D}{2} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

Debit dari wheel sbb :

$$Q = k \cdot (b \cdot d) \cdot v = k \cdot (b \cdot d) \cdot \frac{\omega \cdot D}{2}$$

Example 17 : Suatu Water Wheel jenis Overshot digunakan pada suatu kanal yg lebarnya 1,5 m. Air mengalir di kanal dengan kecepatan 1,5 m/s dengan kedalaman 15 cm. Tentukan daya yg dihasilkan water wheel tersebut dalam HP jika tinggi jatuh air (water fall) sebesar 20 m & efisiensi water wheel sebesar 75%.

Jawab :

| | |
|---------------|--------------------------------------|
| Lebar kanal | $b = 1,5 \text{ m}$ |
| Kecepatan air | $v = 1,5 \text{ m/s}$ |
| Kedalaman air | $d = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$ |
| Tinggi jatuh | $H = 20 \text{ m}$ |
| Efisiensi | $\eta = 75\%$ |

Debit : $Q = a \cdot v = (b \cdot d) \cdot v = 1,5 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} \times 1,5 \text{ m/s}$

$$Q = 0,3375 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sehingga daya yang dihasilkan water wheel sebesar :

$$P = \eta \cdot \frac{w \cdot Q \cdot H}{75} = 0,75 \cdot \frac{1000 \times 0,3375 \times 20}{75}$$
$$= 67,5 \text{ HP}$$

Example 18 : Suatu Overshot Water Wheel yang berdiameter 10 m & mempunyai kedalaman shroud 50 cm diperlukan untuk memproduksi daya 30 HP pada 5 rpm. Dengan mengasumsikan 1/3 bucket terisi dengan air, tentukan kedalaman dari wheel jika tinggi jatuh total (total fall) sebesar 10 m.

Ambil efisiensi dari water wheel sebesar 60%.

Jawab :

Diameter Wheel $D = 10 \text{ m}$

Kedalaman Shroud $d = 50 \text{ cm}$

Daya Wheel $P = 30 \text{ HP}$

Rpm Wheel $N = 5 \text{ rpm}$

Fraksi Bucket Terisi Air $k = 1/3$

Tinggi Jatuh Air $H = 10 \text{ m}$

Efisiensi $\eta = 60 \%$

$b =$ lebar bucket (kedalaman wheel) = ?

$$\begin{aligned} \text{Debit dari Wheel (Q): } Q &= k \cdot (b \cdot d) \cdot \frac{D \cdot \omega}{2} \\ &= \frac{1}{3} \times (b \times 0,5) \times \frac{10}{2} \cdot \left(\frac{2\pi \times 5}{60} \right) \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 0,4363 \cdot b \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Kedalaman wheel (b) dapat ditentukan dari perumusan Daya Wheel (P) sbb :

$$\begin{aligned} P &= \eta \cdot \frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \\ 30 &= 0,6 \times \frac{1000 \times (0,4363 \cdot b) \times 10}{75} \\ b &= 0,86 \text{ m} \end{aligned}$$

2.3 Breast Water Wheel

Pada Breast Wheel air masuk bucket pada bagian breast (tengah-tengah) dari wheel (lihat gambar). Wheel ini berputar sebagian oleh berat air & sebagian oleh gaya impuls air.

Air (dari head race) masuk bucket tanpa kejutan (shock) ke sejumlah laluan (passage) yang dapat terbuka atau tertutup oleh pengaturan rack & pinion pada sluice gate (lihat gambar). Berat air memberikan gaya ke wheel turun sehingga wheel akan berputar.

Ciri khusus dari wheel ini adalah bagian bawah tercelup (immersed) pada air di sisi tail race. Karena arah putaran wheel & aliran air pada tail race sama maka air yang mengalir keluar dari bucket akan memutar wheel (Ini yang dimaksud dengan wheel berputar sebagian karena gaya impuls air & sebagian karena berat air).

Ciri khusus yang lain yaitu diameter wheel lebih besar daripada head air yang tersedia.

Breast Wheel mempunyai detail konstruksi sbb :

| | |
|-----------------------|-------------------------|
| Head Air | $H = 1 - 5 \text{ m}$ |
| Diameter Wheel | $D = 4 - 8 \text{ m}$ |
| Kecepatan Putar Wheel | $N = 3 - 7 \text{ rpm}$ |
| Kedalaman Shroud | $= 30 - 60 \text{ cm}$ |
| Efisiensi | $\eta = 50 - 65 \%$ |

Daya yang dihasilkan (P) :

$$P = \eta \cdot \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

Example 19 : Suatu Breast Wheel berdiameter 8 m dengan lebar 2 m beroperasi pada head 5 m. Kedalaman shroud sebesar 40 cm dan bucket bergerak dengan kecepatan 1,5 m/s dengan kondisi fraksi terisi air 5/8. Hitung daya wheel dalam satuan HP jika efisiensi wheel sebesar 60%.

Jawab :

| | |
|--------------------------|-----------------------|
| Diameter Wheel | $D = 8 \text{ m}$ |
| Lebar Wheel | $b = 2 \text{ m}$ |
| Head Air | $H = 5 \text{ m}$ |
| Kedalaman Shroud | $d = 40 \text{ cm}$ |
| Kecepatan Bucket | $v = 1,5 \text{ m/s}$ |
| Fraksi Bucket Terisi Air | $k = 5/8$ |
| Efisiensi | $\eta = 60 \%$ |

Debit dari Wheel (Q) : $Q = k \cdot (b \cdot d) \cdot v$

$$= \frac{5}{8} \times (2 \times 0,4) \times 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 0,75 \text{ m}^3/\text{s}$$

Daya Wheel (P) :

$$P = \eta \cdot \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

$$= 0,6 \times \frac{1000 \times 0,75 \times 5}{75}$$

$$= 30 \text{ HP}$$

2.4 Undershot Water Wheel

Pada Undershot Wheel air dalam bentuk semburan (jet) menumbuk sudu pada bagian bawah dari wheel (lihat gambar). Wheel ini beroperasi seluruhnya karena gaya impuls air dalam bentuk semburan / jet air. Mula-mula head air yang tersedia dikonversi menjadi head kecepatan (sebelum air menumbuk bucket dari wheel).

Undershot Wheel mempunyai detail konstruksi sbb:

| | |
|-----------------------|-------------------------|
| Head Air | $H < 2 \text{ m}$ |
| Diameter Wheel | $D = 2 - 4 H$ |
| Kecepatan Putar Wheel | $N = 2 - 4 \text{ rpm}$ |
| Efisiensi | $\eta = 35 - 45 \%$ |

Daya yang dihasilkan (P) :

$$P = \eta \cdot \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

Catatan :

Teori tentang Undershot Wheel sama dengan teori Impact Jet pada Rangkaian Sudu Yang Bergerak.

Example 20 : Suatu Undershot Wheel bekerja pada head 2,5 m dengan kecepatan putar 5 rpm. Tentukan diameter wheel jika efisiensinya sebesar 40%. Ambil koefisien kecepatan (C_v) sebesar 0,98 dan rasio kecepatan keliling wheel terhadap kecepatan jet air sebesar 0,46.

Jawab :

| | |
|--------------------------|--|
| Head Air | $H = 2,5 \text{ m}$ |
| Kecepatan Putar Wheel | $N = 5 \text{ rpm}$ |
| Efisiensi Wheel | $\eta = 40 \%$ |
| Koefisien Kecepatan Jet | $C_v = 0,98$ |
| Kecepatan Keliling Wheel | $v = 0,46 \cdot V$ [dgn $V =$ kecepatan jet air] |
| D | = diameter wheel |

Kecepatan Jet Air dapat ditentukan dari :

$$\begin{aligned}
 V &= C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \\
 &= 0,98 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 2,5} \text{ m/s} \\
 &= 6,86 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Sehingga : Kecepatan Keliling Wheel sbb :

$$v = 0,46 \cdot V = 0,46 \times 6,86 = 3,1556 \text{ m/s}$$

Dari rumus Kecepatan Keliling Wheel berikut dapat ditentukan diameter wheel sbb :

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} \\
 D &= \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot N} = \frac{3,1556 \times 60}{\pi \times 5} = 12,05 \text{ m}
 \end{aligned}$$

2.5 Poncelet Water Wheel

Tipe ini adalah pengembangan dari Undershot Wheel. Pada tipe Undershot Wheel sudunya lurus, sedangkan pada tipe Poncelet Wheel sudunya lengkung. Tipe ini seluruhnya beroperasi karena gaya impuls dari air.

Sudu dibuat lengkung sedemikian sehingga semburan (jet) air masuk sudu secara tangensial (tanpa shock). Blade dibuat cukup panjang sehingga air tidak tumpah pada sisi outlet, tetapi secara aktual mengalir turun ke tail race. Sebagai akibat dari hal ini yaitu efisiensi Poncelet Wheel lebih besar.

Poncelet Wheel mempunyai detail konstruksi sbb :

| | |
|-----------------------|-------------------------|
| Head Air | $H = 2 - 3 \text{ m}$ |
| Diameter Wheel | $D = 2 - 4 H$ |
| Kecepatan Putar Wheel | $N = 2 - 5 \text{ rpm}$ |
| Efisiensi | $\eta = 55 - 65 \%$ |

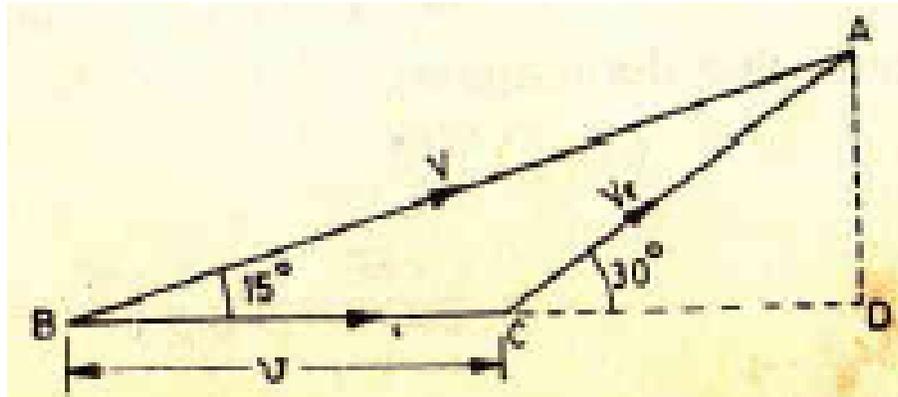
Daya yang dihasilkan (P) :
$$P = \eta \cdot \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

Catatan :

Teori tentang Poncelet Wheel sama dengan teori Impact Jet pada Rangkaian Sudu Yang Bergerak.

Example 21 : Pada sebuah Poncelet Water Wheel, arah jet air pada sudut 15° dan sudut sudu sisi masuk & keluar sebesar 30° . Jika kecepatan jet air sebesar 10 m/s , tentukan :

- Kecepatan ujung (edge) wheel
- Kecepatan & arah air keluar



Gambar 2.

Jawab :

Sudut Jet Air $\alpha = 15^\circ$

Sudut Sudu Inlet & Outlet $\theta = \phi = 30^\circ$

Kecepatan Jet Air $V = 10 \text{ m/s}$

Dari segitiga kecepatan pada sisi masuk didapatkan :

$$BD = V \cdot \cos 15^\circ = 10 \times 0,9659 = 9,659 \text{ m/s}$$

$$DA = V \cdot \sin 15^\circ = 10 \times 0,2588 = 2,588 \text{ m/s}$$

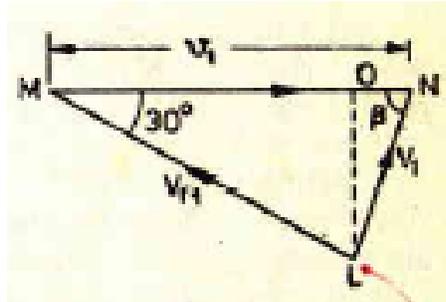
$$CD = \frac{AD}{\tan 30^\circ} = \frac{2,588}{0,5774} = 4,482$$

Sehingga Kecepatan Ujung dari Wheel (v) sbb :

$$\begin{aligned} v &= BC = BD - CD = 9,659 - 4,482 \text{ m/s} \\ &= 5,177 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Dari segitiga kecepatan pada sisi masuk didapatkan kecepatan relatif (V_r) :

$$V_r = CA = BC = 5,177 \text{ m/s}$$



Gambar 2.

Dari segitiga kecepatan pada sisi keluar didapatkan kecepatan relatif (V_{r1}) :

$$V_{r1} = V_r = LM = 5,177 \text{ m/s}$$

Kecepatan Ujung Wheel :

$$v_1 = v = MN = 5,177 \text{ m/s}$$

$$MO = V_{r1} \cdot \cos 30^\circ = 5,177 \times 0,866 = 4,483 \text{ m/s}$$

$$LO = V_{r1} \cdot \sin 30^\circ = 5,177 \times 0,5 = 2,5885 \text{ m/s}$$

Karena $MN (= 5,176)$ adalah lebih besar dari pada $MO (= 4,475)$, sehingga bentuk dari segitiga kecepatan pada sisi keluar seperti terlihat pada gambar.

$$ON = MN - MO = 5,177 - 4,483 = 0,694 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan Air keluar } (V_1) : \quad V_1 = LN &= \sqrt{2,5885^2 + 0,694^2} \text{ m/s} \\ &= 2,68 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sudut β = sudut di mana air keluar (antara kecepatan V_1 & garis horisontal)

Dari geometri segitiga kecepatan pada sisi keluar :

$$\tan \beta = \frac{LO}{ON} = \frac{2,5885}{0,694} = 3,73$$
$$\beta = 74,99^\circ$$

2.6 Keuntungan & Kelemahan Water Wheels

Beberapa keuntungan dari Water Wheel antara lain ::

1. Konstruksi Sederhana & Kuat
2. Sesuai untuk head air yang rendah
3. Murah
4. Memberikan efisiensi yang tetap, bahkan jika debit air tidak konstan

Beberapa kelemahan dari Water Wheel antara lain :

1. Kecepatan putar rendah
2. Konstruksi lebih berat & besar jika dibandingkan dengan kapasitasnya dalam memproduksi daya listrik.
3. Tidak sesuai untuk head air yang tinggi.
4. Kecepatan putarnya tidak mudah diatur.

2.7 Pengembangan Water Wheels

Pada artikel sebelumnya, telah didiskusikan kelemahan dari water wheel (kecepatan putar rendah, konstruksi lebih berat & besar jika dibandingkan dengan kapasitasnya dalam memproduksi daya listrik & tidak sesuai untuk head air yang tinggi).

PLTA kebanyakan ada di daerah terpencil & di pegunungan. Sebagai akibat misalkan ada suatu mills / penggilingan yang membutuhkan listrik, maka PLTA harus ditempatkan di dekat water wheel sehingga hal ini tidak praktis.

Kecepatan putar water wheel yang rendah juga mempengaruhi produksi listrik yang rendah.

Sehingga dikembangkan suatu turbin air (water turbine) yang dapat beroperasi pada head air yang tinggi & mempunyai kecepatan putar yang tinggi sehingga water turbine dapat menghasilkan energi listrik yang lebih besar.

2.8 Keuntungan Turbin Air

Turbin Air mempunyai sejumlah keuntungan dibandingkan Water Wheel, yaitu:

1. Mempunyai ketahanan umur yang lebih lama
2. Lebih efisien & mudah dikontrol
3. Mempunyai kemampuan yang baik sebagai standby unit
4. Dapat dikontrol secara otomatis
5. Dapat beroperasi pada head yang bervariasi.

2.9 Klasifikasi Turbin Air

Turbin air secara luas dapat digolongkan menjadi 2 kelompok, yaitu :

1. Turbin Impuls (Turbin Kecepatan)
 - karena gaya impuls air
 - tak ada perubahan tekanan antara sisi inlet & outlet
2. Turbin Tekanan (Turbin Reaksi)
 - karena beda tekanan sisi inlet & outlet
 - tekanan akan berangsur turun saat melewati baris-baris sudunya

Tutorial

1. Suatu kincir air (water wheel) jenis overshot beroperasi pada head 20 m. Diameter kincir sebesar 7,5 m; lebar 1,2 m; dan mempunyai kedalaman shroud 50 cm. Dengan mengasumsikan bucket terisi air $\frac{1}{3}$ bagian dan efisiensi kincir 60%, tentukan daya tersedia dari kincir tersebut. (Jawab : 50,28 HP)
2. Suatu Breast Wheel berdiameter 5 m dan lebar 1,5 m beroperasi pada head 4,5 m. Kedalaman shroud sebesar 40 cm dan bucket bergerak dengan kecepatan 1,2 m/s dengan fraksi terisi air sebesar $\frac{3}{4}$ bagian. Tentukan efisiensi dari kincir tersebut jika kincir tersebut sanggup menghasilkan daya sebesar 20 HP. (Jawab : 61,7 %)
3. Pada suatu kincir air jenis Poncelet, arah jet air pada sudut 30° dengan tangent terhadap keliling. Jika kecepatan jet 12,5 m/s dan kecepatan wheel 3,75 m/s, tentukan sudut sudu. (Jawab : $53^\circ 48'$)

Ringkasan

1. Kincir air (water wheel) dapat beroperasi dengan : a. berat air seluruhnya, b. sebagian dengan berat air & sebagian dengan impuls air, dan c. seluruhnya dengan impuls air.
2. Pada kincir air jenis Overshot → air masuk bucket pada bagian atas dari kincir.
3. Pada kincir air jenis Breast → air masuk bucket pada bagian tengah dari kincir.
4. Pada kincir air jenis Undershot → air dalam bentuk jet / semburan menumbuk sudu pada bagian bawah kincir.
5. Suatu kincir jenis Poncelet adalah pengembangan dari kincir jenis undershot. Pada kincir Poncelet → air masuk sudu lengkung secara tangensial (tanpa shock).
6. Keuntungan kincir air :
 - a. Konstruksi Sederhana & Kuat
 - b. Sesuai untuk head air yang rendah
 - c. Murah
 - d. Memberikan efisiensi yang tetap, bahkan jika debit air tidak konstan
7. Kelemahan kincir air :
 - a. Kecepatan putar rendah
 - b. Konstruksi lebih berat & besar jika dibandingkan dengan kapasitasnya dalam memproduksi daya listrik.
 - c. Tidak sesuai untuk head air yang tinggi.
 - d. Kecepatan putarnya tidak mudah diatur.
8. Keuntungan turbin air :
 - a. Mempunyai ketahanan umur yang lebih lama
 - b. Lebih efisien & mudah dikontrol
 - c. Mempunyai kemampuan yang baik sebagai standby unit
 - d. Dapat dikontrol secara otomatis
 - e. Dapat beroperasi pada head yang bervariasi.

Pertanyaan

1. Apa yang dimaksud dengan Water Wheel ? Terangkan berbagai macam dari water wheel ?
2. Terangkan dengan sket :
 - a. Overshot Water Wheel
 - b. Breast Water Wheel
 - c. Undershot Water Wheel
 - d. Poncelet Water Wheel
3. Bedakan antara :
 - a. Overshot Water Wheel dan Undershot Water Wheel
 - b. Undershot Water Wheel dan Poncelet Water Wheel
4. Berikan keuntungan dan kelemahan dari suatu water wheel !
5. Berikan keuntungan dari suatu water turbine !
6. Sebutkan & golongan macam-macam water turbine !

3. Turbin Impuls

3.1. Pendahuluan

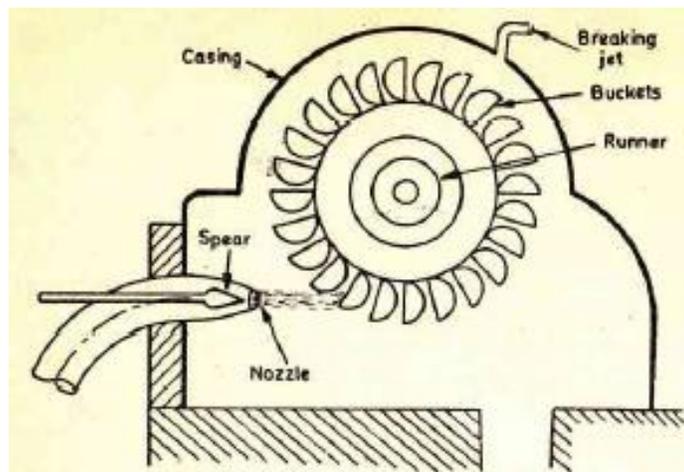
Pada turbin impuls seluruh energi air yang tersedia mula-mula dikonversi menjadi energi kinetik dengan melewati air melalui nosel yang dijaga dekat dengan runner. Air masuk wheel dalam bentuk semburan (jet) yang menumbuk bucket. Semburan (jet) air menumbuk bucket dengan kecepatan tinggi & sesudah mengalir melewati sudu, air keluar dengan kecepatan rendah (energi diberikan ke runner).

Tekanan air (pada sisi masuk & sisi keluar sudu) adalah sama, yaitu bertekanan atmosfer. Contoh yang paling umum dari turbin impuls adalah Pelton Wheel (Turbin Pelton).

3.2. Pelton Wheel

Turbin Pelton adalah turbin impuls yang digunakan untuk head yang tinggi.

Berikut komponen utama dari suatu Turbin Pelton :



Gambar 3.1

3.3 Nozzle

Nosel adalah suatu mekanisme pengarah yang mengarahkan aliran air pada arah yang dirancang & juga mengatur aliran air.

Semburan (jet) air menumbuk bucket. Suatu jarum konikal (spear) beroperasi di dalam nosel dalam arah aliran. Fungsi utama spear adalah untuk mengontrol jumlah air yang mengalir melalui nosel. Jika spear di tekan ke depan, maka akan mengurangi luas penampang jet air, sehingga jumlah air yang mengalir akan berkurang & sebaliknya. Gerakan spear ini diatur secara manual atau otomatis tergantung kebutuhan.

Kadang-kadang sangat penting untuk menutup nosel tiba-tiba. Hal ini dilakukan dengan bantuan spear, namun dapat menyebabkan pipa pecah karena kenaikan tekanan secara tiba-tiba akibat penutupan nosel. Untuk menghindarinya, suatu nosel tambahan (dikenal sebagai nosel bypass) disediakan untuk mengalirkan air tanpa menumbuk bucket.

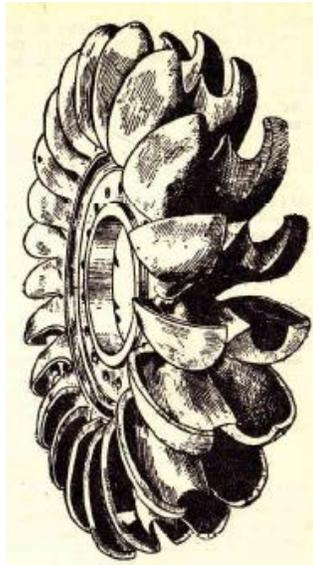
Kadang-kadang suatu plat (dikenal sebagai deflektor) disediakan yang digunakan untuk mendefleksikan semburan air & mencegah menumbuk bucket. Nosel ini diletakkan sangat dekat dengan bucket supaya meminimalisir rugi-rugi aliran.

3.4 Runner & Buckets

Runner dari Turbin Pelton terdiri dari suatu piringan sirkular yang ditempatkan pada poros horisontal. Pada keliling runner, sejumlah bucket dipasangkan secara seragam. Suatu bucket menyerupai mangkok hemisferikal dengan suatu dinding pembatas (dikenal sebagai splitter) pada bagian tengahnya dalam arah radial runner (lihat gambar 3.2.)

Permukaan bucket dibuat sangat halus. Untuk head rendah, bucket dibuat dari besi cor. Namun, untuk head tinggi, bucket dibuat dari kuningan, stainless steel atau baja paduan. Bucket umumnya dibaut ke runner disc. Namun, kadang-kadang bucket & disc dicor menjadi satu.

Kadang-kadang semua keausan wheel sama pada suatu periode waktu, namun pada realitasnya keausan tidak sama untuk setiap bucket. Sejumlah kecil bucket akan aus & rusak lebih awal & perlu penggantian. Hal ini dapat dilakukan jika bucket dibautkan ke disc.



Gambar 3.2

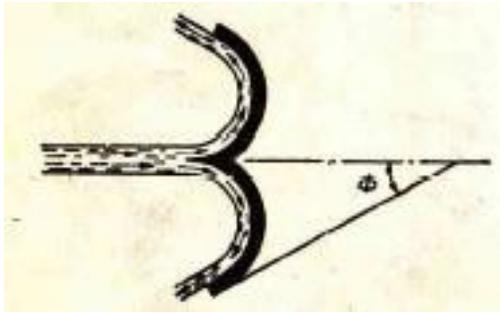
3.5 Casing

Casing dari suatu turbin Pelton tidak mempunyai fungsi hidrolis, namun penting untuk menjaga runner terhadap kecelakaan & untuk mencegah splashing / pukulan air & mengarahkan air ke tail race. Casing secara umum dibuat dengan pengecoran atau fabrikasi.

3.6 Braking Jet

Saat turbin harus berhenti, maka nosel ditutup. Namun runner masih berputar karena inersia (kelembamannya). Supaya runner dapat berhenti pada waktu yg cepat maka diperlukan suatu nosel yg menyemburkan jet air pada sisi belakang bucket yg bertindak sebagai rem untuk mereduksi kecepatan putar runner.

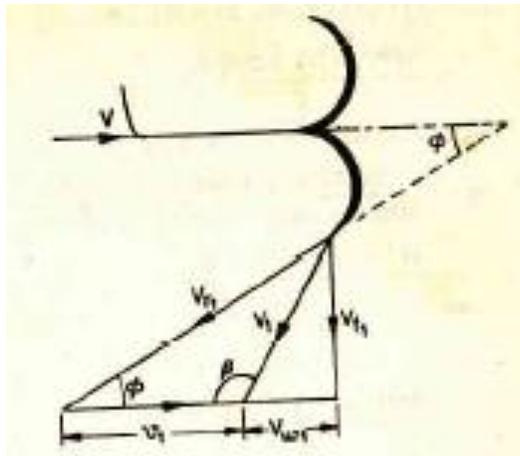
Semburan / jet air dari nosel ini akan menumbuk bucket pada bagian splitter-nya yg membagi jet menjadi 2 aliran.



Gambar 3.3

3.7 Kerja yang dilakukan oleh Turbin Impuls

Kerja yang dilakukan oleh Turbin Impuls



Gambar 3.4

Keterangan :

V = kecepatan absolut air masuk

V_r = kecepatan relatif air ke bucket pada sisi inlet

V_f = kecepatan aliran pada sisi inlet

V_1, V_{r1}, V_{f1} = kecepatan-kecepatan pada sisi keluar

D = diameter wheel

d = diameter nosel

- N = rpm dari wheel
 v = kecepatan tangensial dari bucket
 (dikenal juga sbg kecepatan keliling bucket)
 ϕ = sudut ujung sudu pada sisi outlet
 H = head total air (saat wheel berputar)

Karena segitiga kecepatan sisi inlet adalah suatu garis lurus, maka kecepatan whirl pada inlet :

$$V_w = V \quad \text{dan} \quad V_r = V - v$$

Karena turbin Pelton mempunyai aliran aksial , maka :

$$v = v_1 \quad \text{atau} \quad V_{r1} = V_r = V - v$$

Dari segitiga kecepatan sisi outlet, maka kecepatan whirl pada outlet adalah :

$$V_{w1} = V_{r1} \cdot \cos\phi - v = (V - v) \cdot \cos\phi - v$$

$$\begin{aligned} \frac{\text{Impact Jet}}{\text{kgf air}} &= \text{Perubahan Kecepatan Whirl} = V_w - V_{w1} \\ &= \frac{1}{g} \cdot (V_w + V_{w1}) \end{aligned}$$

Pada kasus ini V_{w1} bernilai negatif (-), karena V_{w1} pada arah berlawanan arah dengan kecepatan V_w

$$\begin{aligned}
\frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{kgf air}} &= \frac{1}{g} \cdot (V_w \cdot v + V_{w1} \cdot v_1) \\
&= \frac{V_w \cdot v}{g} + \frac{V_{w1} \cdot v}{g} && \text{(karena } v_1 = v) \\
&= \frac{V_w \cdot v}{g} + \frac{(V_{r1} \cdot \cos \phi - v) \cdot v}{g} && \text{(karena } V_{w1} = V_{r1} \cdot \cos \phi - v) \\
&= \frac{v}{g} \cdot \{V_w + [(V - v) \cdot \cos \phi - v]\} && \text{(karena } V_{r1} = V_r = V - v) \\
&= \frac{v}{g} \cdot (V + V \cdot \cos \phi - v \cdot \cos \phi - v) && \text{(karena } V_w = V) \\
&= \frac{v}{g} \cdot [V \cdot (1 + \cos \phi) - v \cdot (1 + \cos \phi)] \\
&= \frac{v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi)}{g}
\end{aligned}$$

$$\frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{kgf air}} = \frac{v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi)}{g}$$

Sehingga Efisiensi Hidrolik :

$$\begin{aligned}
\eta_h &= \frac{\text{Kerja Yang Dilakukan} / \text{kgf air}}{\text{Energi Yang Disuplai} / \text{kgf air}} \\
&= \frac{v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi) / g}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} \\
&= \frac{2 \cdot v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi)}{V^2} \\
\eta_h &= \frac{2 \cdot v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi)}{V^2}
\end{aligned}$$

Untuk nilai efisiensi maksimum, numerator persamaan di atas dideferensialkan terhadap v dan hasilnya disamakan dengan nol.

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dv} \cdot 2 \cdot v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi) &= 0 \\ \frac{dE}{dv} \cdot [(2 \cdot V \cdot v - 2 \cdot v^2) \cdot (1 + \cos \phi)] &= 0 \\ 2 \cdot V - 4 \cdot v &= 0 \\ v &= \frac{V}{2} \end{aligned}$$

Ini berarti bahwa kecepatan wheel (untuk nilai efisiensi hidrolis maksimum) adalah $\frac{1}{2}$ dari kecepatan jet.

Sehingga :

$$\begin{aligned} \frac{\text{Kerja Maksimum Yang Dilakukan}}{\text{kgf air}} &= \frac{v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi)}{g} \\ &= \frac{\frac{V}{2} \cdot \left(V - \frac{V}{2}\right) \cdot (1 + \cos \phi)}{g} \quad (\text{substitusikan } v = \frac{V}{2}) \\ &= \frac{V^2}{4 \cdot g} \cdot (1 + \cos \phi) \end{aligned}$$

Jadi Efisiensi Hidrolis Maksimum sbb :

$$\eta_{h, \max} = \frac{\frac{V^2}{4 \cdot g} \cdot (1 + \cos \phi)}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} = \frac{(1 + \cos \phi)}{2}$$

Catatan :

1. Efisiensi akan maksimum jika $\cos \phi = 1$ atau $\phi = 180^\circ$. Namun secara praktis, semburan (jet) didefleksikan hanya 160° hingga 165° . Karena jika semburan (jet) didefleksikan 180° , air yang keluar dari 1 bucket akan mengenai bucket di depannya.
2. Secara aktual, telah ditemukan bahwa efisiensi maksimum terjadi jika kecepatan wheel 0,46 kali kecepatan semburan (jet).

$$v = 0,46 \cdot V$$

3.8 Daya yang dihasilkan Turbin Impuls

Daya Turbin Impuls dalam Horse Power (HP) dapat dirumuskan sbb :

$$P = \frac{\text{Kerja Yang Dilakukan} / \text{kgf air} \times \text{Berat Air Yang Mengalir dalam kgf} / \text{detik}}{75} \text{ [HP]}$$

$$P = \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

Dalam satuan SI, Daya Turbin Impuls [Watt] sbb :

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \text{ [W]}$$

3.9 Efisiensi Turbin Impuls

Secara umum, efisiensi dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara Kerja Yang Dilakukan terhadap Energi Yang Disuplai.

Suatu Turbin Impuls mempunyai 3 macam efisiensi yaitu :

1. Efisiensi Hidrolik (Hydraulic Efficiency)
2. Efisiensi Mekanik (Mechanical Efficiency)
3. Efisiensi Keseluruhan (Overall Efficiency)

3.10 Efisiensi Hidrolik

Efisiensi Hidrolik adalah rasio antara Kerja Yang Dilakukan (pada Wheel) dengan Energi Semburan (Jet) Air

$$\eta_h = \frac{2 \cdot v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi)}{V^2}$$

Efisiensi Hidrolik Maksimum :

$$\eta_{h, \max} = \frac{(1 + \cos \phi)}{2}$$

3.11 Efisiensi Mekanik

Efisiensi Mekanik adalah rasio antara Kerja Aktual Turbin dengan Energi Yang Diberikan ke Wheel

3.12 Efisiensi Keseluruhan

Efisiensi Keseluruhan adalah ukuran prestasi suatu turbin dan dapat didefinisikan sebagai rasio antara Daya Yang Dihasilkan Turbin dengan Energi Aktual Yang Disuplai ke Turbin

$$\eta_{\text{overall}} = \eta_h \cdot \eta_m = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75}\right)}$$

Example 22 : Suatu turbin Pelton menghasilkan daya 4500 HP dengan head air 100 m dan efisiensi keseluruhan 85 %. Tentukan diameter nosel jika koefisien kecepatan untuk nosel sebesar 1.

Jawab :

| | |
|-----------------------|------------------|
| Daya yang dihasilkan | P = 4500 HP |
| Head Air | H = 100 m |
| Efisiensi Keseluruhan | $\eta_o = 85 \%$ |
| Koefisien Kecepatan | $C_v = 1$ |
| d = diameter nosel | = ... ? |

Kecepatan Jet (V) :

$$\begin{aligned} V &= C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 1 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 100} \text{ m/s} \\ &= 44,29 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Dengan persamaan untuk Efisiensi Keseluruhan akan didapat debit turbin Pelton sbb :

$$\begin{aligned} \eta_o &= \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75}\right)} \\ 0,85 &= \frac{4500}{\left(\frac{1000 \times Q \times 100}{75}\right)} \\ Q &= 3,97 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Debit total dari turbin sama dengan debit yang mengalir sebagai jet / semburan air, sehingga :

$$Q = V \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right)$$

$$3,97 = 44,29 \times \frac{\pi}{4} \times d^2$$

$$d = \sqrt{\frac{3,97 \times 4}{44,29 \times \pi}} = 0,3378 \text{ m} = 33,78 \text{ cm}$$

Example 23 : Suatu turbin Pelton yang mempunyai bucket semi-circular dan bekerja pada head air 140 m berputar pada 600 rpm. Debit melalui nosel sebesar 50 liter/detik dan diameter turbin sebesar 60 cm.

Tentukan :

- Daya HP yang tersedia pada nosel
- Efisiensi hidrolis turbin jika koefisien kecepatan sebesar 0,98

Jawab :

Karena bucket berbentuk semi-circular, maka sudut dimana jet air didefleksikan

$$\phi = 180^\circ$$

Head Air $H = 140 \text{ m}$

Kecepatan putar turbin $N = 600 \text{ rpm}$

Debit $Q = 50 \text{ liter/detik} = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$

Diameter turbin $D = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$

Koefisien kecepatan $C_v = 0,98$

Daya HP yang tersedia pada nosel (P) = ?

$$P = \frac{w \cdot Q \cdot H}{75} = \frac{1000 \times 0,05 \times 140}{75} = 93,3 \text{ HP}$$

Efisiensi hidrolik turbin (η_h) = ?

Kecepatan dari jet air (V) :

$$\begin{aligned} V &= C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,98 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 140} \text{ m/s} \\ &= 51,36 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Kecepatan tangensial dari turbin (v) :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 0,6 \times 600}{60} = 18,85 \text{ m/s}$$

Dari hubungan efisiensi hidrolik akan didapatkan :

$$\begin{aligned} \eta_h &= \frac{2 \cdot v \cdot (V - v) \cdot (1 + \cos \phi)}{V^2} \\ &= \frac{2 \times 18,85 \times (51,36 - 18,85) \times (1 - \cos 180^\circ)}{51,36^2} \\ &= 0,929 = 92,9\% \end{aligned}$$

Example 24 : Suatu turbin Pelton yang beroperasi pada head 500 m menghasilkan daya 13.000 kW pada 429 rpm. Jika efisiensi turbin sebesar 85 %, tentukan :

- Debit turbin
- Diameter turbin
- Diameter nosel

Jawab :

| | |
|------------------------|-----------------|
| Head Air | H = 500 m |
| Daya turbin | P = 13.000 kW |
| Kecepatan putar turbin | N = 429 rpm |
| Efisiensi keseluruhan | $\eta_o = 85\%$ |

Debit dari turbin (Q) = ?

Dgn menggunakan hubungan efisiensi keseluruhan :

$$\eta_o = \frac{P}{9,81 \cdot Q \cdot H}$$
$$0,85 = \frac{13.000}{9,81 \cdot Q \cdot 500}$$
$$Q = 3,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diameter Turbin (D) = ?

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$
$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N}$$

Asumsikan :

- Koefisien kecepatan nosel $C_v = 0,98$
- Rasio kecepatan keliling turbin dengan kecepatan jet air

$$v = 0,46 \cdot V$$

Kecepatan jet air (V) :

$$V = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,98 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 500} \text{ m/s}$$
$$= 97,06 \text{ m/s}$$

Sehingga kecepatan keliling turbin (v) :

$$v = 0,46 \cdot V = 0,46 \cdot 97,06 = 44,65 \text{ m/s}$$

Dari persamaan kecepatan tangensial turbin dapat ditentukan diameter turbin sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$
$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N} = \frac{60 \times 44,65}{\pi \times 429} = 1,99 \text{ m}$$

Diameter nosel (d) = ?

Debit turbin harus sama dengan debit melalui nosel, sehingga diameter nosel dapat ditentukan sbb :

$$Q = V \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right)$$
$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} = \sqrt{\frac{4 \times 3,12}{\pi \times 97,06}} = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$$

Example 25 : Pembangkit Listrik Pykara di India Selatan dilengkapi dengan turbin impuls berjenis turbin Pelton. Tiap turbin menghasilkan daya maksimum 19.000 HP jika beroperasi pada head 900 m dan kecepatan putar 600 rpm.

Tentukan :

- Diameter jet air minimal dan
- Diameter rata-rata turbin.

Asumsikan efisiensi keseluruhan turbin sebesar 89,2 %.

Jawab :

Daya yang dihasilkan $P = 19.000 \text{ HP}$

Head Air $H = 900 \text{ m}$

Kecepatan putar turbin $N = 600 \text{ rpm}$

Efisiensi keseluruhan $\eta_o = 89,2 \%$

d = diameter jet air

V = kecepatan jet air

Diameter jet air minimal (d) = ?

$$Q = V \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right)$$

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

Dari hubungan efisiensi keseluruhan akan didapat debit turbin sbb :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$0,892 = \frac{19.000}{\left(\frac{1000 \times Q \times 900}{75} \right)}$$

$$Q = 1,775 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kecepatan jet air (V) :

$$\begin{aligned} V &= C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,98 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 900} \text{ m/s} \\ &= 130,23 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Debit turbin harus sama dengan debit jet air melalui nosel, sehingga diameter jet air dapat ditentukan sbb :

$$Q = V \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right)$$

$$1,775 = 130,23 \times \frac{\pi}{4} \times d^2$$

$$d = 13,17 \text{ cm}$$

Diameter rata-rata turbin (D) = ?

Kecepatan keliling turbin (v) :

$$v = 0,46 \cdot V = 0,46 \times 130,23 = 59,9 \text{ m/s}$$

Diameter turbin (D) dapat ditentukan dari rumus kecepatan keliling turbin sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$
$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N} = \frac{60 \times 59,9}{\pi \times 600} = 1,9 \text{ m}$$

Example 26 : Suatu turbin Pelton mempunyai kecepatan tangensial bucket 15 m/s. Air disuplai pada head 36 m pada debit 20 liter/detik. Bucket mendefleksi jet air pada sudut 160°. Jika koefisien kecepatan nosel sebesar 0,98, tentukan daya yang dihasilkan turbin dalam satuan HP.

Jawab :

Kecepatan tangensial bucket $v = 15 \text{ m/s}$

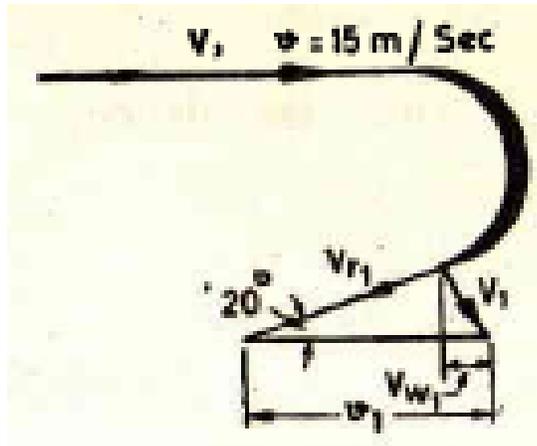
Head Air $H = 36 \text{ m}$

Debit aliran $Q = 20 \text{ liter/detik}$

Sudut jet terdefleksi $= 160^\circ$

$$\phi = 180^\circ - 160^\circ = 20^\circ$$

Koefisien Kecepatan $C_v = 0,98$



Gambar 3.5

Kecepatan Jet Air (V) :

$$V = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,98 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 36} \text{ m/s}$$

$$= 26,05 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan sisi inlet, kecepatan whirl pada sisi inlet :

$$V_w = 26,05 \text{ m/s} \quad (\text{dari gambar segitiga kecepatan inlet } V = V_w)$$

dan kecepatan relatif pada sisi inlet :

$$V_r = V - v = 26,05 - 15 = 11,05 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan sisi outlet, kecepatan relatif pada sisi outlet :

$$V_{r1} = V_r = 11,05 \text{ m/s}$$

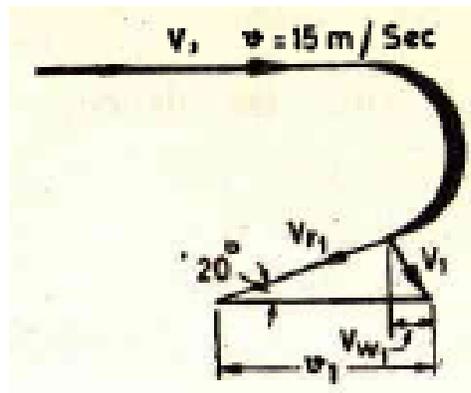
$$\text{dan kecepatan bucket : } v_1 = v = 15 \text{ m/s}$$

Jadi : Kecepatan Whirl pada sisi outlet :

$$V_{w1} = v_1 - V_{r1} \cdot \cos \phi = 15 - 11,05 \cdot \cos 20^\circ$$

$$= 4,62 \text{ m/s}$$

Karena $V_{r1} \cdot \cos \phi (= 11,05 \cdot \cos 20^\circ = 10,38)$ kurang dari $v (= 15)$, maka bentuk segitiga kecepatan pada sisi outlet akan seperti pada gambar terlampir.



Gambar 3.6

Kecepatan whirl (V_{w1}) adalah positif (+) pada kasus ini (karena sama arahnya dengan arah V_w)

$$\frac{\text{Kerja Yang Dilakukan}}{\text{Berat Air dalam kgf}} = \frac{v}{g} \cdot (V_w - V_{w1})$$

$$= \frac{15}{9,81} \cdot (26,05 - 4,62) = 32,77 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

Sehingga Daya Yang Dihasilkan (P) :

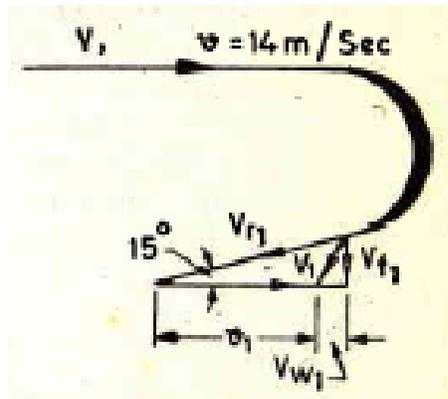
$$P = \frac{\text{Debit dalam kg} \times \text{Kerja Yang Dilakukan}}{75 \text{ kgf Air}}$$

$$= \frac{1000 \times 0,02 \times 32,77}{75} = 8,74 \text{ HP}$$

Example 27 : Suatu turbin Pelton bekerja pada head 45 m dan debit melalui jet air sebesar 800 liter/detik. Kecepatan rata-rata wheel sebesar 14 m/s. Tentukan efisiensi dan daya yang dihasilkan turbin jika jet air didefleksikan oleh bucket pada sudut 165°. Asumsikan koefisien kecepatan sebesar 0,985

Jawab :

| | |
|--------------------------------|---|
| Head Air | $H = 45 \text{ m}$ |
| Debit | $Q = 800 \text{ liter/detik}$ |
| Kecepatan bucket | $v = 14 \text{ m/s}$ |
| Sudut jet didefleksikan bucket | $= 165^\circ$ |
| | $\phi = 180^\circ - 165^\circ = 15^\circ$ |
| Koefisien kecepatan | $C_v = 0,985$ |



Gambar 3.7

Kecepatan jet air (V) :

$$V = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,985 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 45} \text{ m/s}$$

$$= 29,27 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan inlet, kecepatan whirl inlet sbb :

$$V_w = 29,27 \text{ m/s}$$

dan kecepatan kecepatan relatif pada inlet (V_r) :

$$V_r = V - v = 29,27 - 14 = 15,27 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan outlet, kecepatan relatif :

$$V_{r1} = V_r = 15,27 \text{ m/s}$$

Kecepatan bucket :

$$v_1 = v = 14 \text{ m/s}$$

Kecepatan whirl pada sisi outlet :

$$\begin{aligned} V_{w1} &= V_{r1} \cdot \cos \phi - v \\ &= 15,27 \cdot \cos 15^\circ - 14 \\ &= 0,75 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Karena $V_{r1} \cdot \cos \phi$ ($= 15,27 \cdot \cos 15^\circ = 14,75$) lebih besar dari pada v ($= 14$), maka bentuk segitiga kecepatan outlet seperti terlihat di gambar.

Dengan hubungan :

$$\begin{aligned} \frac{\text{Kerja Yang Dilakukan}}{\text{Berat Air dalam kgf}} &= \frac{v}{g} \cdot (V_w + V_{w1}) \\ &= \frac{14}{9,81} \cdot (29,27 + 0,75) = 42,87 \text{ kgf} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Daya Turbin yang dihasilkan (P) :

$$P = \frac{\text{Debit dalam kg} \times \text{Kerja Yang Dilakukan}}{75 \text{ kgf Air}}$$

$$= \frac{(1000 \times 0,8) \times \left[\frac{14 \times (29,27 + 0,75)}{9,81} \right]}{75} = 456,98 \text{ HP}$$

Efisiensi Turbin :

$$\eta = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$= \frac{456,98}{\left(\frac{1000 \times 0,8 \times 45}{75} \right)} = 0,947 = 95,2\%$$

Tutorial

1. Suatu turbin Pelton berdiameter 1 m pada head 550 m. Tentukan kecepatan runner jika koefisien kecepatan 0,98 dan rasio kecepatan 0,47 ($v/V = 0,47$).

(Jawab : 920 rpm)

2. Suatu turbin Pelton yang beroperasi pada head 40 m menghasilkan daya 100 HP berputar pada kecepatan putar 250 rpm. Dengan asumsi efisiensi keseluruhan 80 % dan koefisien kecepatan 0,98, tentukan diameter turbin (D) dan diameter jet air (d).

(Jawab : 98,5 cm dan 10,3 cm)

3. Suatu turbin Pelton yang beroperasi pada head 30 m disuplai air dengan debit 1.150 liter/detik. Kecepatan tangensial runner sebesar 12 m/s dan jet air didefleksikan balik oleh bucket pada sudut 160° . Dengan mengabaikan rugi-rugi gesek, tentukan daya yang dihasilkan turbin dalam satuan HP. Asumsikan koefisien kecepatan sebesar 0,98.

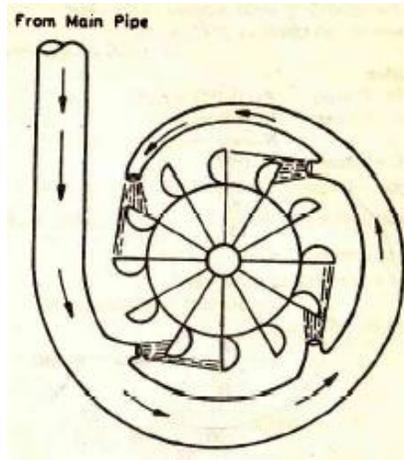
(Jawab : 415 HP)

4. Suatu turbin Pelton yang beroperasi pada head 172 m disuplai air dengan debit 190 liter/detk. Kecepatan putar turbin sebesar 1000 rpm dan jet air didefleksikan balik pada sudut 160° . Dengan mengasumsikan nilai yang wajar untuk koefisien kecepatan dan rasio kecepatan (v/V), tentukan daya yang dihasilkan turbin dalam satuan HP dan efisiensi hidroliknya.

(Jawab : 407,5 HP dan 93,5 %)

3.13 Jumlah Jet untuk Pelton Wheel

Suatu Turbin Pelton secara umum hanya mempunyai sebuah semburan (jet) air. Namun jika sebuah jet air tidak dapat menghasilkan daya turbin yg diperlukan, turbin Pelton dapat diberikan sejumlah jet air.



Gambar 3.8

Secara umum, jumlah maksimum jet air yang disediakan untuk sebuah Turbin Pelton adalah 6 jet air. Saat mendesain & meletakkan lokasi jet air, harus pada jarak yang sama di sekeliling Pelton Wheel.

Kadang-kadang sebagai pengganti suplai jet air ke turbin, 2 atau 3 Wheel ditempatkan pada sebuah poros turbin. Sistem semacam ini dikenal sebagai Overhung Wheel

Example 28 : Suatu turbin Pelton jenis double overhung secara langsung dikopel ke generator 10.000 kW. Tentukan daya yang dihasilkan tiap runner jika efisiensi generator sebesar 94%.

Jawab :

$$\begin{aligned}\text{Daya keluaran per unit} &= 10.000 \text{ kW} \\ \text{Efisiensi generator} &\eta = 94\% = 0,94\end{aligned}$$

Daya yang dibangkitkan oleh runner :

$$P_{\text{runner}} = \frac{10.000}{0,94} = 10.638,3 \text{ kW}$$

Karena turbin Pelton adalah jenis overhung, dimana ada 2 runner, maka daya yang dihasilkan tiap generator sebesar :

$$P_{\text{tiap generator}} = \frac{10.638,3}{2} = 5.319,15 \text{ kW}$$

Example 29 : Suatu turbin Pelton harus memproduksi daya 18.000 BHP pada head netto 800 m & beroperasi pada kecepatan putar 600 rpm. Jika koefisien jet $k_v = 0,97$, rasio kecepatan = 0,46 & rasio antara diameter jet terhadap diameter wheel sebesar 1/15, tentukan :

- Jumlah Jet Air
- Diameter Jet Air
- Diameter Lingkaran Pitch
- Debit Air yang disuplai ke turbin

Asumsikan koefisien keseluruhan sebesar 85 %.

Jawab :

$$\begin{aligned}\text{Daya yang dihasilkan} &P = 18.000 \text{ BHP} \\ \text{Head Air} &H = 800 \text{ m} \\ \text{Kecepatan Putar} &N = 600 \text{ rpm} \\ \text{Koefisien Jet} &k_v = 0,97 \\ \text{Kecepatan Wheel} &v = 0,46 \cdot V \\ \text{Diameter Jet Air} &d = D/15 \quad (D = \text{diameter wheel}) \\ \text{Koefisien keseluruhan} &\eta_o = 85\% = 0,85\end{aligned}$$

Debit air yang disuplai ke Wheel (Q) = ?

Dengan hubungan *efisiensi keseluruhan*, debit air yang disuplai dapat ditentukan sbb :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$
$$0,85 = \frac{18.000}{\left(\frac{1000 \cdot Q \cdot 800}{75} \right)}$$
$$Q = 1,985 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diameter Lingkaran Pitch / Wheel (D) = ?

Kecepatan jet air (V) :

$$V = k_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,97 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 800} = 121,53 \text{ m/s}$$

Kecepatan keliling (v) :

$$v = 0,46 \cdot V = 0,46 \cdot 121,53 = 55,90 \text{ m/s}$$

Kecepatan Keliling (v) dapat juga dinyatakan sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

Sehingga : Diameter Lingkaran Pitch / Wheel (D) :

$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N} = \frac{60 \cdot 55,9}{\pi \cdot 600} = 1,78 \text{ m}$$

Diameter Jet Air (d) :

$$d = \frac{D}{15} = \frac{1,78}{15} = 0,12 \text{ m}$$

Jumlah Jet Air (n) = ?

Debit total turbin harus sama dengan debit jet, sehingga jumlah jet air dapat ditentukan sbb :

$$Q = n \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right) \cdot V$$
$$1,985 = n \times \frac{\pi}{4} \times 0,12^2 \times 121,53$$
$$n = 1,44 \approx 2 \text{ Jet Air}$$

3.14 Ukuran Bucket dari Pelton Wheel

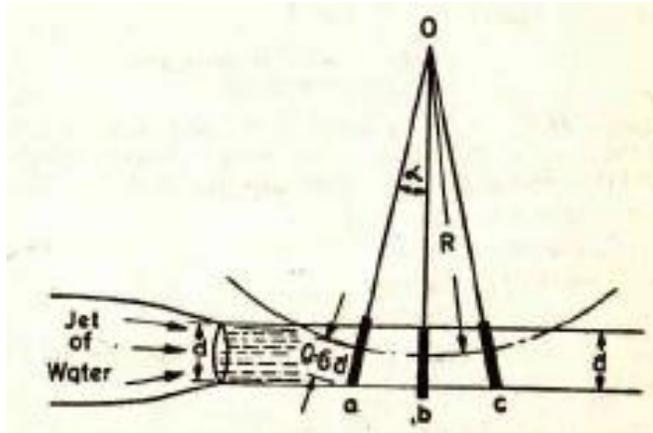
Bucket suatu Turbin Pelton mempunyai dimensi sbb :

- Lebar Bucket = 5 . d
- Kedalaman Bucket = 1,2 . d (d = diameter jet)

3.15 Jumlah Bucket dari Pelton Wheel

Jumlah Bucket (pada keliling Turbin Pelton) dapat ditentukan oleh 2 prinsip sbb :

1. Jumlah Bucket hendaknya sesedikit mungkin sehingga rugi-rugi akibat gesekan sekecil mungkin.
2. Semburan (Jet) Air harus benar-benar dimanfaatkan sehingga tidak ada air dari jet yang terbuang percuma.



Gambar 3.9

Keterangan :

R = Radius dari Lingkaran Bucket Rata-Rata

d = Diameter Jet Air

a, b, c = 3 Bucket yang berdekatan

α = Sudut yang dipisahkan oleh 2 Bucket yang berdekatan yang diukur dari pusat Wheel

Perhatikan 3 bucket (a, b, c) pada gambar di atas. Sebelum keadaan spt gambar di atas, semburan (jet) air menumbuk bucket b. Namun, pada kejadian ini, jet air akan mengenai bucket a. (Hal ini terjadi saat ujung luar bucket mengenai bagian terendah dari jet). Perlu dicatat bahwa tumbukan jet ke bucket terjadi saat sekitar setengah dari kedalaman bucket ($0,6 d$) bersentuhan dengan bagian terendah jet air.

Pada sub-bab sebelumnya sdh dirumuskan bahwa kecepatan jet air adalah $2 \times$ kecepatan bucket. Sehingga waktu perjalanan bucket b ke posisi c adalah sama dengan waktu yang ditempuh partikel air (saat di posisi bucket a) ke posisi bucket c.

Dari geometri pada gambar di atas, sudut α dapat ditentukan sbb :

$$\cos \alpha = \frac{R + 0,5 \cdot d}{R + 0,6 \cdot d}$$

Jumlah Bucket (teoritik) dapat ditentukan dari :

$$\text{Jumlah Bucket} = \frac{360^\circ}{\alpha}$$

Catatan : Ini adalah perumusan teoritik dalam penentuan jumlah bucket yang diperlukan oleh Turbin Pelton. Namun secara praktis, jumlah bucket yang disediakan hanya $\frac{1}{2}$ dari jumlah perumusan teoritik di atas.

Perumusan empirik yang sering digunakan dalam penentuan jumlah bucket adalah sbb :

$$\text{Jumlah Bucket (empirik)} = \left(\frac{D}{2 \cdot d} + 15 \right)$$

Dengan :

D = diameter rata-rata bucket

d = diameter jet air

Example 30 : Suatu turbin Pelton beroperasi pada head 150 m dengan kecepatan putar 300 rpm. Efisiensi keseluruhan turbin sebesar 85 % dan rasio diameter jet terhadap diameter turbin sebesar 1/10. Tentukan :

- a. Diameter Turbin
- b. Diameter Jet
- c. Lebar Bucket
- d. Kedalaman Bucket
- e. Jumlah Bucket

Jawab :

| | |
|------------------------|-------------------------|
| Head Air | H = 150 m |
| Kecepatan putar turbin | N = 300 rpm |
| Efisiensi keseluruhan | $\eta_o = 85 \% = 0,85$ |
| Rasio diameter | $d = (1/10) \cdot D$ |
| Koefisien kecepatan | $C_v = 0,98$ (asumsi) |

Diameter Turbin (D) = ?

Kecepatan Jet Air (V) :

$$V = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,98 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 150} = 53,16 \text{ m/s}$$

Kecepatan keliling runner (v) :

$$v = 0,46 \cdot V = 0,46 \times 53,16 = 24,45 \text{ m/s}$$

Kecepatan keliling runner (v) juga dapat ditentukan dari :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

Sehingga : Diameter Turbin (D) :

$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N} = \frac{60 \times 24,45}{\pi \times 300} = 1,56 \text{ m}$$

Diameter Jet Air (d) = ... ?

$$d = \frac{\text{Diameter Wheel}}{10} = \frac{1,56}{10} = 0,156 \text{ m} = 15,6 \text{ cm}$$

Lebar Bucket :

$$\text{Lebar Bucket} = 5 \cdot d = 5 \times 15,6 = 78 \text{ cm}$$

Kedalaman Bucket :

$$\text{Kedalaman Bucket} = 1,2 \cdot d = 1,2 \times 15,6 = 18,72 \text{ cm}$$

Jumlah Bucket :

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Bucket} &= \frac{D}{2 \cdot d} + 15 \\ &= \frac{1,56}{2 \times 0,156} + 15 = 20 \end{aligned}$$

3.16 Desain Pelton Wheel

Suatu Turbin Pelton secara umum didesain untuk suatu Head Air yang diberikan, daya turbin yang diproduksi & rpm dari runner. Perancangan suatu Turbin Pelton akan menentukan sejumlah parameter, yaitu:

1. Diameter Wheel
2. Diameter Jet Air
3. Lebar (width) dari Bucket
4. Kedalaman (depth) dari Bucket
5. Jumlah Bucket

Jika sejumlah data tidak didapatkan dalam perancangan, sejumlah data berikut dapat diasumsikan (yang akan menghasilkan hasil terbaik) :

1. Efisiensi Overall antara 80% - 87% (sebaiknya 85%)
2. Koefisien Kecepatan, C_v antara 0,98 – 0,99 (sebaiknya 0,985)
3. Rasio antara kecepatan keliling terhadap kecepatan jet = 0,46

Example 31 : Rancanglah suatu turbin Pelton dengan data sebagai berikut :

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Head Air | $H = 150 \text{ m}$ |
| Daya yang dihasilkan | $P = 800 \text{ HP}$ |
| Kecepatan putar | $N = 360 \text{ rpm}$ |

Asumsikan data-data lain yang belum tersedia dengan harga yang wajar.

Jawab :

| | |
|----------------------|-----------------------|
| Head Air | $H = 150 \text{ m}$ |
| Daya yang dihasilkan | $P = 800 \text{ HP}$ |
| Kecepatan Putar | $N = 360 \text{ rpm}$ |

Asumsi :

- Koefisien kecepatan $C_v = 0,985$
- Rasio kecepatan $v = 0,46 \cdot V$
- Efisiensi keseluruhan $\eta_o = 85 \% = 0,85$

Kecepatan Jet Air (V) :

$$V = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,985 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 150} = 53,44 \text{ m/s}$$

Kecepatan keliling turbin (v) :

$$v = 0,46 \cdot V = 0,46 \times 53,44 = 24,58 \text{ m/s}$$

Kecepatan keliling turbin (v) dapat juga dirumuskan sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

Sehingga : Diameter turbin (D) :

$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N} = \frac{60 \times 24,58}{\pi \times 360} = 1,304 \text{ m}$$

Diameter Jet Air (d) = ?

Dari hubungan efisiensi keseluruhan (η_o) :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$
$$0,85 = \frac{800}{\left(\frac{1000 \times Q \times 150}{75} \right)}$$
$$Q = 0,47 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debit turbin harus sama dengan debit jet air, sehingga diameter jet air dapat ditentukan sbb :

$$Q = V \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right)$$
$$0,47 = 53,44 \times \frac{\pi}{4} \times d^2$$
$$d = 0,1058 \text{ m} = 10,58 \text{ cm}$$

Lebar Bucket :

$$\text{Lebar Bucket} = 5 \cdot d = 5 \times 10,58 = 52,9 \text{ cm}$$

Kedalaman Bucket :

$$\text{Kedalaman Bucket} = 1,2 \cdot d = 1,2 \times 10,58 = 12,696 \text{ cm}$$

Jumlah Bucket (dari rumus empirik) :

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Bucket} &= \frac{D}{2 \cdot d} + 15 \\ &= \frac{1,304}{2 \times 0,1058} + 15 = 21 \end{aligned}$$

Tutorial

1. Suatu turbin Pelton yang beroperasi pada head 380 m menghasilkan daya 16.250 HP dengan kecepatan putar 750 rpm. Tentukan diameter turbin dan jumlah jet air jika efisiensi keseluruhan turbin sebesar 86 %.

(Jawab : 1 m dan 4)

2. Suatu turbin Pelton beroperasi pada head 300 m menghasilkan daya 8.010 HP dengan kecepatan putar 600 rpm dan efisiensi keseluruhan sebesar 90 %. Rasio diameter jet terhadap diameter turbin sebesar $\frac{1}{8}$. Koefisien kecepatan nosel 0,98 dan rasio kecepatan tangensial turbin terhadap kecepatan jet sebesar 0,46. Tentukan :

- a. Debit aliran
- b. Diameter turbin
- c. Jumlah Jet Air

(Jawab : 2,225 m³/s; 1,1 m; dan 2)

3. Suatu turbin Pelton yang beroperasi pada head efektif 40 m menghasilkan daya 100 HP pada 250 rpm. Efisiensi keseluruhan turbin 80 % dan koefisien kecepatan nosel 0,98. Tentukan :

- a. Diameter Jet Air
- b. Lebar Bucket
- c. Kedalaman Bucket
- d. Jumlah Bucket

(Jawab : 10,3 cm; 51,5 cm; 12,4 cm; dan 20)

4. Suatu turbin Pelton jenis twin jet beroperasi pada head 50 m dan menghasilkan daya 120 HP pada 300 rpm. Dengan mengasumsikan efisiensi keseluruhan 90 % dan koefisien kecepatan 0,86, tentukan :

- a. Diameter Jet Air
- b. Lebar Bucket
- c. Kedalaman Bucket
- d. Jumlah Bucket

(Jawab : 6,5 cm; 32,5 cm; 7,8 cm; dan 22)

Pertanyaan

1. Apa yang dimaksud dengan turbin impuls ?
2. Terangkan perbedaan antara turbin impuls dan turbin reaksi ?
3. Terangkan dengan suatu sket sederhana kerja dari suatu turbin impuls ?
4. Turunkan persamaan efisiensi hidrolis dari suatu turbin Pelton ?
5. Tunjukkan dari prinsip pertama bahwa nilai teoritik untuk koefisien keliling suatu turbin Pelton sebesar 0,5 ?
6. Tergantung dari faktor apa saja jumlah jet pada suatu turbin Pelton ?
7. Berapa rasio lebar bucket dan kedalaman bucket terhadap diameter jet air ?
8. Dengan sket yang rapi (yang memberikan operasi yang lengkap), terangkan bagaimana turbin diatur untuk beroperasi pada kecepatan putar yang konstan.

4. Turbin Reaksi

4.1 Pendahuluan

Pada turbin reaksi, air masuk turbin dalam kondisi bertekanan & mengalir melalui sudu-sudu. Head tekanan dari air saat mengalir melalui sudu-sudu turbin dikonversi menjadi head kecepatan & akhirnya tekanannya turun hingga tekanan atmosfer pada sisi keluar turbin.

4.2 Komponen Utama Turbin Reaksi

Turbin reaksi mempunyai komponen-komponen utama sbb :

1. Pipa pesat (Penstock)
2. Spiral Casing
3. Mekanisme Guide
4. Runner

4.3 Penstock

Penstock adalah suatu pipa air yang digunakan untuk mengalirkan air dari reservoir air ke casing turbin. Pada sisi inlet dari penstock, screen (trashrack) dipasang untuk menyaring kotoran yang akan masuk.

Penstock umumnya dibuat di lapangan (site) & diuji terhadap :

- a. Kebocoran (leak-proof)
- b. Keamanan kerja

4.4 Casing Spiral

Air dari penstock dialirkan di saluran pengarah (guide ring) dalam suatu casing. Casing ini dirancang sedikian rupa sehingga luas penampangnya maksimum pada sisi masuk & minimum pada sisi keluar sehingga bentuk dari casing adalah spiral. Sehingga casing sering disebut : Spiral Casing atau Scroll Casing.

Spiral casing diberi lubang inspeksi (inspection hole) & alat ukur tekanan (pressure gauge).

Material dari spiral casing tergantung pada head air dimana turbin beroperasi, yaitu sbb :

| | |
|-------------------------|------------------|
| Beton (concrete) | H = hingga 30 m |
| Plat baja rol las-lasan | H = hingga 100 m |
| Baja cor | H > 100 m |

4.5 Mekanisme Guide

Sudu pengarah (guide vane) yaitu sudu-sudu yang diletakkan pada wheel yang tetap yang ada di antara 2 wheel yang berputar. Wheel yang berputar yang berisikan sudu-sudu tetap ini dipasang pada spiral casing.

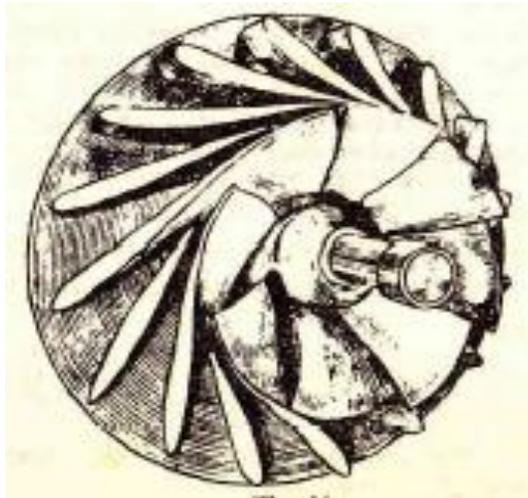
Sudu pengarah (guide vane) dirancang dgn pertimbangan :

- a. Agar air masuk runner tanpa shock (hal ini dilakukan dengan menjaga kecepatan relatif pada sisi inlet runner dengan arah tangensial terhadap sudut sudu).
- b. Agar air masuk sesuai kebutuhan debit dari turbin (hal ini dilakukan dengan mengatur pembukaan sudu pengarah).

Semua sudu pengarah dapat berputar terhadap engselnya. Sudu pengarah dapat tertutup atau terbuka dengan suatu poros pengatur (regulating shaft) sehingga debit yang dibutuhkan sesuai dengan kebutuhan.

4.6 Turbine Runner

Runner dari turbin reaksi terdiri dari sudu-sudu runner (runner blade) yang tetap ke suatu poros atau ring tergantung pada tipe turbin.



Gambar 4.1

Sudu (blade) dirancang sehingga air masuk & keluar runner tanpa shock. Runner dikunci ke poros yang dapat vertikal atau horisontal. Jika poros vertikal, turbin disebut turbin vertikal. Jika poros horizontal, turbin disebut turbin horisontal.

4.7 Perbedaan antara Turbin Impuls & Turbin Reaksi

Tabel 4.1

| No. | Turbin Impuls | Turbin Reaksi |
|-----|--|--|
| 1. | Semua energi tersedia dari air mula-mula dikonversi menjadi energi kinetik. | Energi tersedia dari air tidak dikonversi dari 1 bentuk energi ke bentuk energi yang lainnya. |
| 2. | Air mengalir melalui nosel & menumbuk bucket yang dipasang pada keliling wheel. | Air diarahkan dengan sudu pengarah (guide blade) ke sudu putar. |
| 3. | Air menumbuk bucket dengan energi kinetik. | Air mengalir pada sudu putar dengan energi tekanan. |
| 4. | Tekanan air yang mengalir tetap tidak berubah & sama dengan tekanan atmosfer. | Tekanan air yang mengalir berkurang setelah air melewati sudu. |
| 5. | Tidak masalah apakah turbin tercelup semua atau ada celah udara antara sudu & wheel. | Wheel harus selalu tercelup air. |
| 6. | Air dapat mengalir pada sebagian keliling wheel atau seluruh keliling wheel. | Air melewati seluruh keliling dari wheel. |
| 7. | Dimungkinkan untuk mengatur aliran tanpa rudi-rigi aliran. | Tidak dimungkinkan untuk mengatur aliran tanpa rugi-rugi aliran. |
| 8. | Kerja yang dilakukan hanya oleh perubahan energi kinetik dari jet air. | Kerja dilakukan sebagian oleh perubahan head kecepatan, namun hampir seluruhnya oleh perubahan head tekanan. |

4.8 Klasifikasi Turbin Reaksi

Turbin reaksi dapat digolongkan menjadi 3 macam tergantung dari arah aliran air melalui wheel, yaitu :

- a. Turbin aliran radial
- b. Turbin aliran aksial
- c. Turbin aliran campur

4.9 Turbin aliran Radial

Pada turbin aliran radial aliran air dalam arah radial (sepanjang radius wheel). Turbin aliran radial dapat digolongkan menjadi 2 yaitu :

- a. Turbin Aliran Radial Masuk (Inward Flow Turbine)
Air masuk wheel dari sisi keliling wheel menuju ke pusat dari wheel.
- b. Turbin Aliran Radial Keluar (Outward Flow Turbine)
Air masuk dari pusat wheel menuju sisi keliling wheel.

4.10 Turbin Aliran Aksial

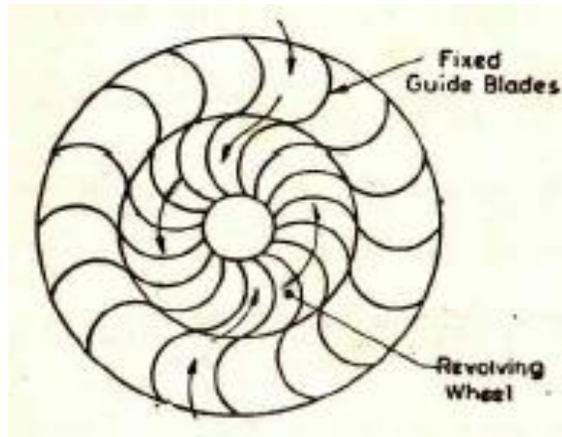
Pada turbin aliran aksial, air mengalir sejajar dengan sumbu wheel. Turbin ini disebut juga sebagai turbin aliran sejajar (paralel).

4.11 Turbin Aliran Campur

Turbin aliran campur adalah jenis turbin dimana aliran sebagian berarah radial & sebagian berarah aksial.

4.12 Turbin Reaksi Aliran Inward (Menuju Pusat Turbin)

Pada turbin reaksi jenis inward flow, air masuk wheel pada sisi keliling wheel menuju pusat wheel. Turbin ini terdiri dari sudu pengarah tetap (fixed guide blade, yang mengarahkan air masuk ke wheel yang berputar (revolving wheel) pada sudut yang tepat. Ini dilakukan dengan mengatur sudut sudu secara tangensial kecepatan relatif air & revolving wheel. Air melewati sudu & memberikan sejumlah gaya ke revolving wheel melalui sudu-sudunya. Gaya ini menyebabkan revolving wheel berputar.



Gambar 4.2.

Perlu dicatat bahwa jika beban pada turbin berkurang akan menyebabkan poros berputar pada rpm yang lebih tinggi.

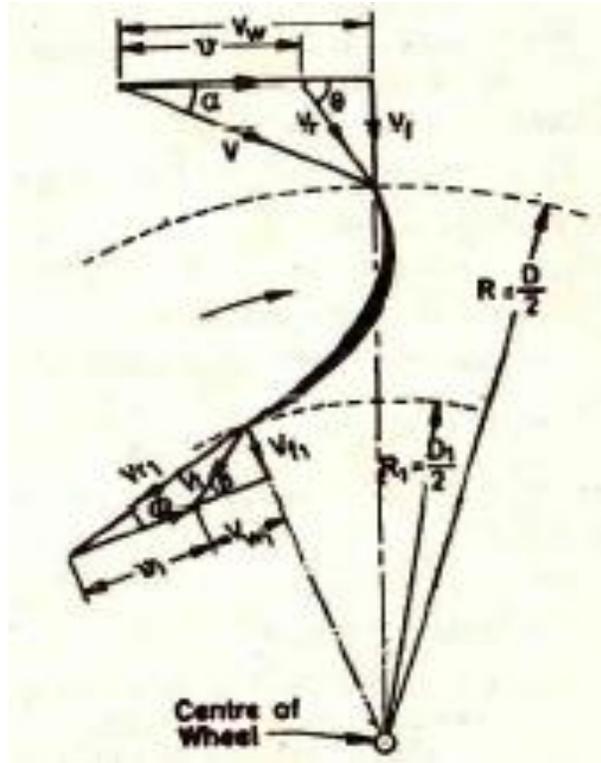
Gaya sentrifugal yang naik karena rpm yang naik → cenderung mengurangi jumlah air yang mengalir melalui sudu sehingga kecepatan air pada sisi masuk juga berkurang. Hal ini akhirnya akan menurunkan daya yang dihasilkan turbin.

Ini adalah keuntungan dari turbin reaksi jenis aliran inward bahwa turbin dapat mengatur secara otomatis sesuai beban yang diperlukan turbin.

Efisiensi tertinggi didapatkan jika kecepatan dari air yang keluar turbin sekecil mungkin.

4.13 Kerja yang Dihasilkan oleh Turbin Reaksi Aliran Inward

Efisiensi atau daya yang dihasilkan oleh turbin dapat ditentukan dengan menggambar segitiga kecepatan pada sisi inlet dan sisi outlet (lihat gambar)



Gambar 4.3.

Keterangan :

V = kecepatan mutlak air yg masuk

D = diameter luar wheel

N = rpm wheel

v = kecepatan tangensial wheel pada inlet

(disebut juga kecepatan keliling pada inlet)

V_r = kecepatan relatif air terhadap wheel pada inlet

V_f = kecepatan aliran pada inlet

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

$V_1, D_1, v_1, V_{r1}, V_{f1}$ = parameter-parameter pada sisi outlet

α = sudut air masuk wheel (disebut pula sudut sudu pengarah)

β = sudut air keluar wheel

θ = sudut ujung sudu pada inlet (= sudut sudu pada inlet)

ϕ = sudut ujung sudu pada outlet (= sudut sudu pada outlet)

H = head total air

W = berat air masuk wheel / detik [kgf/s]

Dari segitiga kecepatan sisi inlet → didapat :

$$V_w = V \cdot \cos \alpha \quad V_f = V \cdot \sin \alpha$$

Dari segitiga kecepatan sisi outlet → didapat :

$$V_{w,1} = V \cdot \cos \beta \quad V_{f,1} = V \cdot \sin \beta$$

Kerja per kgf air sbb : = Perubahan kecepatan whirl

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{g} \cdot [V_w - (-V_{w,1})] \\ &= \frac{1}{g} \cdot [V_w + V_{w,1}] \end{aligned}$$

(Dalam kasus ini, $V_{w,1}$ negatif (-) → karena $V_{w,1}$ dalam arah yg berlawanan dgn V_w)

Kerja yang dilakukan per kgf air sbb :

$$\begin{aligned} &= \text{Gaya} \times \text{Kecepatan} \\ &= (\text{Kecepatan Whirl Inlet} \times \text{Kecepatan Tangensial Wheel Inlet}) \\ &\quad - (\text{Kecepatan Whirl Outlet} \times \text{Kecepatan Tangensial Wheel Outlet}) \\ &= \frac{1}{g} \cdot [(V_w \cdot v) - (V_{w,1} \cdot v_1)] = \frac{V_w \cdot v}{g} - \frac{V_{w,1} \cdot v_1}{g} \end{aligned}$$

Energi yang hilang per kgf air yg melewati wheel :

$$= H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g}$$

Jika tidak ada rugi-rugi energi lainnya, maka :

$$\frac{V_w \cdot v}{g} - \frac{V_{w,1} \cdot v_1}{g} = H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g}$$

Jika debit turbin dalam arah radial, maka :

$$\begin{aligned}\beta &= 90^\circ \\ V_{w,1} &= 0 \\ V_1 &= V_{f,1}\end{aligned}$$

Sehingga : Kerja per kgf air :

$$= \frac{V_w \cdot v}{g} \quad (V_{w,1} = 0)$$

Maka :

$$\begin{aligned}\frac{V_w \cdot v}{g} &= H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} \\ &= H - \frac{(V_{f,1})^2}{2 \cdot g}\end{aligned}$$

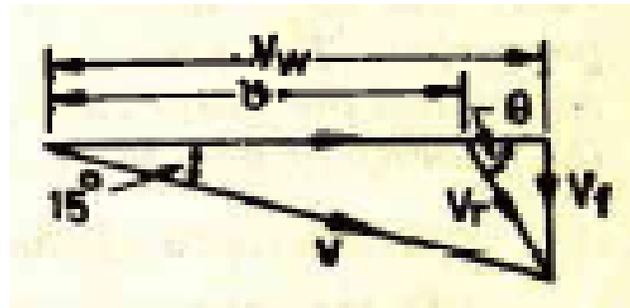
$$(V_1 = V_{f,1})$$

Example 22-1 : Suatu turbin reaksi aliran inward yang mempunyai diameter luar 1,5 m berputar pada 400 rpm. Kecepatan aliran pada inlet 10 m/s. Jika sudut sudu pengarah sebesar 15°, tentukan :

- Kecepatan mutlak air
- Kecepatan whirl pada inlet
- Sudut sudu dari runner pada sisi inlet
- Kecepatan relatif pada inlet

Jawab :

Diameter pada inlet $D = 1,5 \text{ m}$
 Kecepatan putar turbin $N = 400 \text{ rpm}$
 Kecepatan aliran pada inlet $V_f = 10 \text{ m/s}$
 Sudut sudu pengarah $\alpha = 15^\circ$
 Kecepatan mutlak inlet, $V = \dots ?$



Kecepatan sudu pada sisi inlet (v) :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 1,5 \times 400}{60} = 31,42 \text{ m/s}$$

Kecepatan mutlak inlet (V) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet → dapat ditentukan kecepatan mutlak air :

$$\begin{aligned} V &= \frac{V_f}{\sin 15^\circ} \\ &= \frac{10}{\sin 15^\circ} = 38,64 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Kecepatan Whirl pada inlet (V_w) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow dapat juga ditentukan kecepatan whirl inlet :

$$\begin{aligned}V_w &= V \cdot \cos 15^\circ = 38,64 \times \cos 15^\circ \\ &= 37,32 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Sudut Sudu Runner pada inlet (θ) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow didapat :

$$\begin{aligned}\tan \theta &= \frac{V_f}{V_w - v} = \frac{10}{37,32 - 31,42} = 1,695 \\ \theta &= 59,46^\circ\end{aligned}$$

Kecepatan Relatif pada inlet (V_r) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow kecepatan relatif inlet sbb :

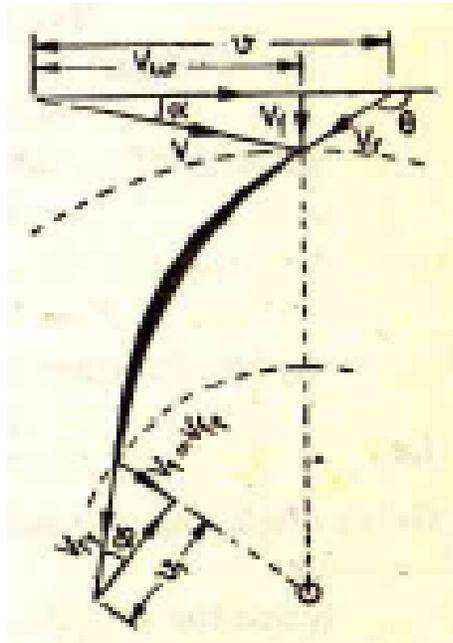
$$\begin{aligned}V_r &= \frac{V_f}{\sin 59,46^\circ} = \frac{10}{\sin 59,46^\circ} \text{ m/s} \\ &= 11,61 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Example 22-3 : Suatu turbin reaksi aliran inward disuplai air dengan laju 600 liter/detik & kecepatan aliran (V_f) 2 m/s. Kecepatan keliling 24 m/s dan kecepatan whirls 18 m/s. Dengan mengasumsikan debit berarah radial pada outlet dan kecepatan aliran konstan ($V_{f,1} = V_f$), tentukan :

- Sudut sudu inlet
- Head air pada turbin

Jawab :

Debit aliran $Q = 600$ liter/detik
 Kecepatan aliran inlet $V_f = 2$ m/s
 Kecepatan keliling inlet $v = 24$ m/s
 Kecepatan whirl inlet $V_w = 18$ m/s
 Kecepatan aliran konstan $\rightarrow V_{f,1} = V_f = 2$ m/s



Sudut sudu inlet (q) = ?

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow dapat ditentukan sudut sudu inlet sbb :

$$\tan(180^\circ - \theta) = \frac{V_f}{(v - V_w)} = \frac{2}{24 - 18} = 0,3333$$

$$(180^\circ - \theta) = 18,43^\circ$$

$$\theta = 161,57^\circ$$

Head Air pada Wheel (H) = ... ?

Karena debit adalah radial pada outlet → maka kecepatan whirl pada outlet = 0

$$\begin{aligned}\frac{V_w \cdot v}{g} &= H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} \\ &= H - \frac{(V_{f,1})^2}{2 \cdot g} && \text{(karena : } V_1 = V_{f,1} \text{)} \\ &= H - \frac{(V_f)^2}{2 \cdot g} && \text{(karena : } V_{f,1} = V_f \text{)} \\ \frac{18 \times 24}{9,81} &= H - \frac{2^2}{2 \times 9,81} \\ H &= \frac{18 \times 24}{9,81} + \frac{2^2}{2 \times 9,81} = 44,24 \text{ m}\end{aligned}$$

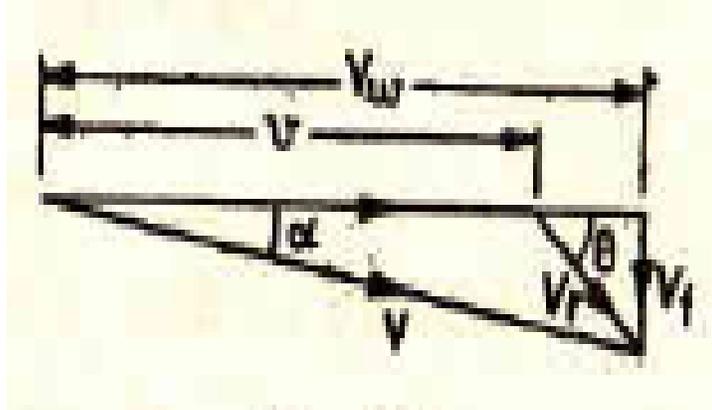
Example 22-4 : Suatu turbin reaksi aliran inward bekerja pada head 25 m dan berputar pada 300 rpm. Kecepatan keliling wheel sebesar 30 m/s dan kecepatan aliran sebesar 4 m/s. Jika rugi-rugi hidrolis sebesar 20% dari head yang tersedia dan debit dalam arah radial, tentukan :

- Sudut sudu pengarah pada inlet
- Sudut wheel pada inlet
- Diameter wheel

Jawab :

| | |
|--------------------------|--------------------------|
| Head air | H = 25 m |
| Kecepatan putar | N = 300 rpm |
| Kecepatan keliling inlet | v = 30 m/s |
| Kecepatan aliran inlet | V _f = 4 m/s |
| Rugi-rugi hidrolis | = 20% dari head tersedia |

$$\frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} = 20\% \times H = 20\% \times 25 \text{ m} = 5 \text{ m}$$



Sudut sudu pengarah pada inlet (α) = ... ?

Karena debit berarah radial \rightarrow maka kecepatan whirl pada outlet = nol, sehingga :

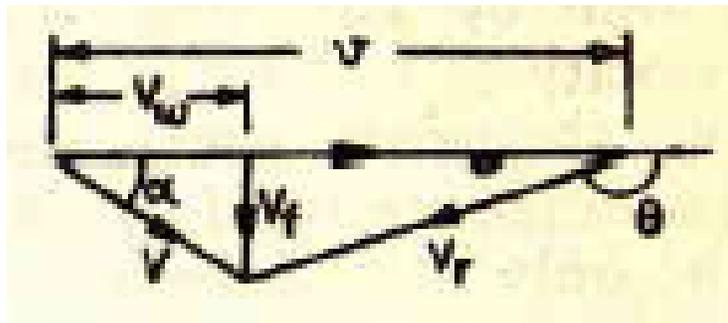
$$\frac{V_w \cdot v}{g} = H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g}$$

$$\frac{V_w \times 30}{9,81} = 25 - 5 = 20$$

$$\left(\text{karena: } \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} = 5 \text{ m} \right)$$

$$V_w = \frac{20 \times 9,81}{30} = 6,54 \text{ m/s}$$

Karena V_w (= 6,54 m/s) lebih kecil dari pada v (= 30 m/s) \rightarrow maka segitiga kecepatan inlet seperti pada gambar.



Dari segitiga kecepatan inlet → sudut (α) dapat ditentukan sbb :

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{4}{6,54} = 0,6116$$

$$\alpha = 31,45^\circ$$

Sudut Wheel pada inlet (θ) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet didapat sbb :

$$\tan (180^\circ - \theta) = \frac{V_f}{(v - V_w)} = \frac{4}{30 - 6,54} = 0,1705$$

$$(180^\circ - \theta) = 9,68^\circ$$

$$\theta = 170,32^\circ$$

Diameter Wheel (D) = ?

Diameter wheel (D) ditentukan dari perumusan kecepatan keliling pada inlet sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N} = \frac{60 \times 30}{\pi \times 300} = 1,91 \text{ m}$$

4.14 Turbin Reaksi Aliran Outward (Menjauhi Pusat Turbin)

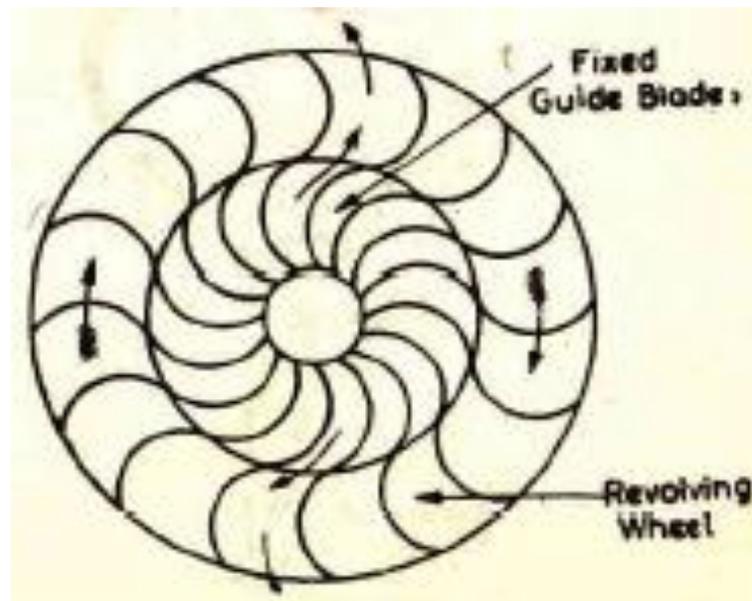
Turbin Reaksi Aliran Outward yaitu suatu turbin reaksi dimana air masuk pada pusat wheel & selanjutnya mengalir dalam arah radial ke arah keliling wheel. Turbin Reaksi Aliran Outward terdiri dari sudu pengarah tetap yang mengarahkan air masuk ke revolving wheel pada sudut yang tepat. (Ini dilakukan dengan mengatur sudut sudu secara tangensial terhadap kecepatan relatif air & revolving wheel).

Saat air mengalir melalui sudu, air memberikan gaya pada revolving wheel melalui sudu-sudunya. Gaya ini menyebabkan revolving wheel berputar.

Perbedaan antara turbin reaksi aliran inward & outward yaitu : hanya terletak pada sudu pengarahnya (lihat gambar)

Pada jenis inward → sudu pengarah pada sisi sebelah luar

Pada jenis outward → sudu pengarah pada sisi sebelah dalam



Perlu dicatat bahwa saat beban pada turbin berkurang → akan menyebabkan poros berputar lebih cepat.

Gaya sentrifugal yang naik (karena kenaikan rpm turbin) cenderung menaikkan debit air yang mengalir melalui sudu → sehingga turbin cenderung semakin cepat.

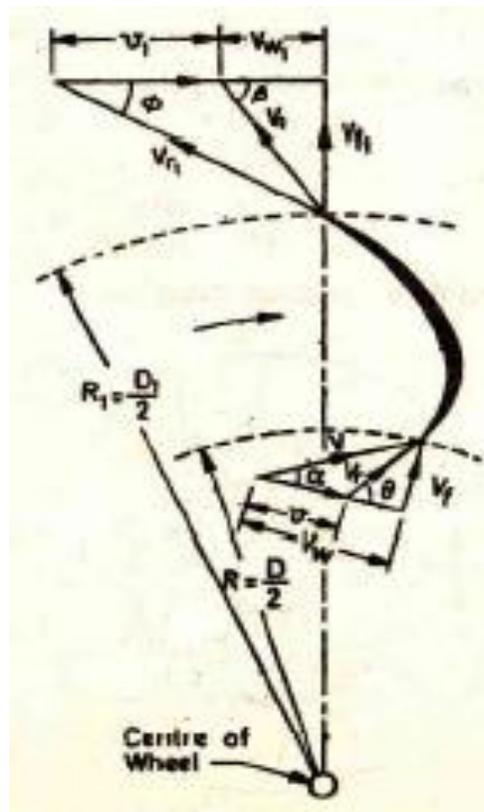
Ini adalah kelemahan dari turbin reaksi aliran outward → sehingga turbin jenis ini harus diatur putarannya dengan governor.

Semua notasi untuk turbin reaksi outward → sama dengan notasi untuk jenis inward.

Diameter dalam wheel = D (diameter pada inlet)

Diameter luar wheel = D_1 (diameter pada outlet).

Efisiensi & daya yang dihasilkan turbin → dapat ditentukan dengan menggambar segitiga kecepatan inlet & outlet (lihat gambar).



Example 22-5 : Suatu turbin reaksi aliran outward mempunyai diameter wheel dalam 1 m dan diameter wheel luar 2 m. Air masuk sudu pada sudut 20° dan keluar sudu secara radial. Jika kecepatan aliran konstan pada 10 m/s dan kecepatan putar wheel pada 300 rpm; tentukan sudut sudu pada inlet & pada outlet.

Jawab :

Diameter wheel dalam $D = 1 \text{ m}$

Diameter wheel luar $D_1 = 2 \text{ m}$

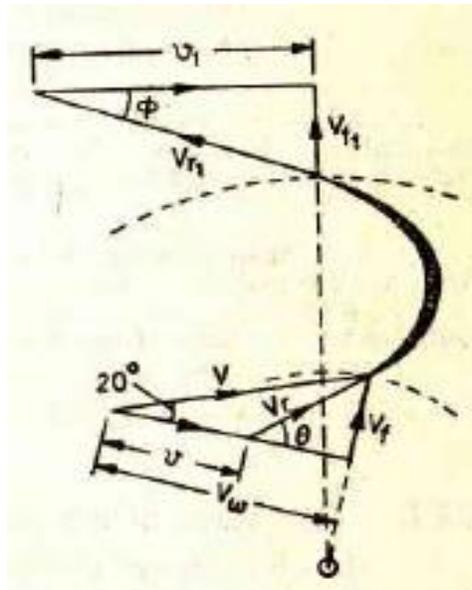
Sudut air masuk wheel $\alpha = 20^\circ$

Debit berarah radial pada outlet

Kecepatan aliran konstan

$$\rightarrow V_f = V_{f,1} = 10 \text{ m/s}$$

Kecepatan putar wheel $N = 300 \text{ rpm}$



Sudut sudu pada inlet (θ) = ?

Kecepatan tangensial pada inlet sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 1 \times 300}{60} = 15,71 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow kecepatan whirl pada inlet (V_w) & sudut sudu pada inlet (θ) sbb:

$$V_w = \frac{10}{\tan 20^\circ} = 27,5 \text{ m/s}$$

$$\tan \theta = \frac{V_f}{(V_w - v)} = \frac{10}{27,5 - 15,71} = 0,8482$$

$$\theta = 40,3^\circ$$

Sudut sudu pada inlet (ϕ) = ?

Kecepatan keliling pada outlet :

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 2 \times 300}{60} = 31,42 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan outlet \rightarrow dapat ditentukan sudut sudu outlet sbb :

$$\tan \phi = \frac{V_{f,1}}{v_1} = \frac{10}{31,42} = 0,3183$$

$$\phi = 17,66^\circ$$

Tutorial

1. Suatu turbin reaksi aliran inward yang mempunyai diameter luar sebesar 1 m beroperasi pada 180 rpm. Sudut sudu pengarah sebesar 15° . Jika kecepatan aliran pada inlet sebesar 3 m/s, tentukan :
 - a. Kecepatan keliling pada inlet
 - b. Kecepatan whirl pada inlet
 - c. Kecepatan mutlak air pada inlet
 - d. Sudut sudu pada inlet

(Jawab : 9,42 m/s; 11,3 m/s; 11,68 m/s; dan $59^\circ 30'$)

2. Suatu turbin reaksi aliran inward yang mempunyai diameter luar 50 cm beroperasi pada 200 rpm. Jika debit berarah radial pada outlet; tentukan kecepatan keliling pada outlet & sudut sudu pada outlet.

(Jawab : 7,41 m/s dan $32^\circ 28'$)

3. Suatu turbin reaksi aliran inward yang mempunyai diameter luar 2 m dan diameter dalam 1 m beroperasi pada 192 rpm. Sudut sudu pengarah sebesar 10° dan kecepatan aliran konstan pada inlet & outlet sebesar 5 m/s. Gambarkan segitiga kecepatan pada inlet & outlet dan tentukan:

- a. Sudut sudu pada inlet & outlet
- b. Kecepatan mutlak air keluar sudu pengarah

(Jawab : $20^\circ 54'$; $25^\circ 30'$; dan 28,8 m/s)

4.15 Debit suatu Turbin Reaksi

Debit dari turbin reaksi dapat ditentukan baik dari energi gross yang disuplai ke turbin maupun dari kecepatan aktual aliran pada inlet atau outlet.

1. Dari Energi Gross Yang Disuplai ke Turbin

$$\text{Daya Gross yang disuplai ke Turbin} = \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

Keterangan :

H = Head air yang disuplai [m]

Q = Debit turbin [liter/s]

2. Dari Kecepatan Aliran

Debit air yang masuk turbin (Q) :

$$Q = \pi \cdot D \cdot b \cdot V_f$$

Keterangan :

V_f = kecepatan aliran pada inlet

D = diameter wheel pada inlet

b = lebar wheel pada inlet

Analog : Air yang keluar dari turbin :

$$Q_1 = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot V_{f,1}$$

Karena air masuk turbin = air keluar turbin, maka :

$$\pi \cdot D \cdot b \cdot V_f = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot V_{f,1}$$

Example 22-7 : Suatu turbin reaksi aliran outward mempunyai diameter dalam 2,4 m dan diameter luar 3 m. Turbin mempunyai debit berarah radial sebesar 6 m³/s dan berputar pada 200 rpm. Head total turbin sebesar 40 m dan lebar wheel pada inlet & pada outlet sama sebesar 30 cm. Dengan mengabaikan ketebalan sudu, tentukan :

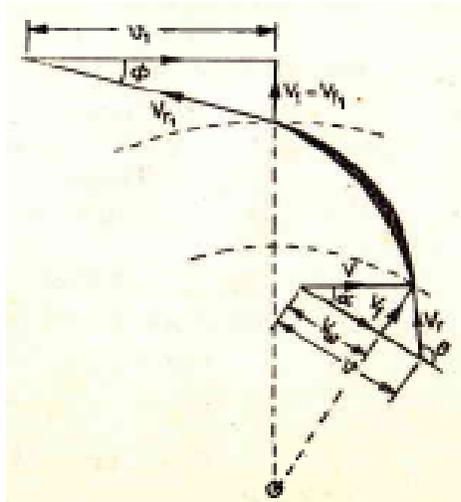
- Kecepatan aliran inlet (V_f)
- Kecepatan aliran outlet ($V_{f,1}$)
- Kecepatan whirl inlet (V_w)

Jawab :

| | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Diameter dalam | $D = 2,4 \text{ m}$ |
| Diameter luar | $D_1 = 3 \text{ m}$ |
| Debit aliran | $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Kecepatan putar turbin | $N = 200 \text{ rpm}$ |
| Head pada turbin | $H = 40 \text{ m}$ |
| Lebar wheel pada inlet | $b = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$ |
| Lebar wheel pada outlet | $b_1 = b = 0,3 \text{ m}$ |
| Debit berarah radial pada outlet | |

Kecepatan keliling pada inlet (v) :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 2,4 \times 200}{60} = 25,13 \text{ m/s}$$



Kecepatan aliran pada inlet (V_f) = ... ?

Kecepatan aliran pada inlet (V_f) → dapat ditentukan dari persamaan debit (Q) pada inlet sbb :

$$Q = \pi \cdot D \cdot b \cdot V_f$$

$$V_f = \frac{Q}{\pi \cdot D \cdot b} = \frac{6}{\pi \times 2,4 \times 0,3} = 2,65 \text{ m/s}$$

Kecepatan aliran pada outlet ($V_{f,1}$) = ... ?

Kecepatan aliran pada outlet ($V_{f,1}$) → dapat ditentukan dari persamaan debit (Q) pada outlet sbb :

$$Q = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot V_{f,1}$$

$$V_{f,1} = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot b_1} = \frac{6}{\pi \times 3 \times 0,3} = 2,12 \text{ m/s}$$

Kecepatan Whirl pada inlet (V_w) :

Karena debit berarah radial \rightarrow maka kecepatan whirl pada outlet ($V_{w,1}$) sama dengan nol.

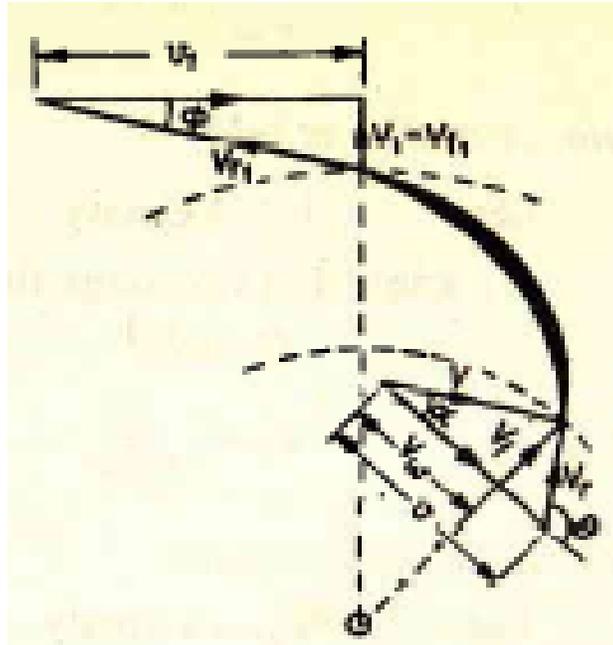
Kecepatan Whirl pada inlet (V_w) \rightarrow dapat ditentukan sbb :

$$\begin{aligned}\frac{V_w \cdot v}{g} &= H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} \\ &= H - \frac{(V_{f,1})^2}{2 \cdot g} \quad (\text{karena } V_{f,1} = V_1) \\ \frac{V_w \times 25,12}{9,81} &= 40 - \frac{(2,12)^2}{2 \times 9,81} \\ V_w &= 15,53 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Example 22-8 : Suatu turbin reaksi aliran outward yang berputar pada 200 rpm disuplai air dengan laju aliran 5000 liter/detik pada head air 40 m. Diameter dalam wheel sebesar 2 m dan diameter luar wheel sebesar 2,5 m. Lebar wheel pada inlet dan pada outlet sama sebesar 20 cm. Dengan mengasumsikan debit berarah radial, tentukan sudut turbin pada inlet & pada outlet !

Jawab :

| | |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| Kecepatan putar turbin | $N = 200 \text{ rpm}$ |
| Debit turbin | $Q = 5000 \text{ liter/s}$ |
| Head air | $H = 40 \text{ m}$ |
| Diameter dalam wheel | $D = 2 \text{ m}$ |
| Diameter luar wheel | $D_1 = 2,5 \text{ m}$ |
| Lebar wheel pada inlet | $b = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$ |
| Lebar wheel pada outlet | $b_1 = b = 0,2 \text{ m}$ |
| Debit berarah radial pada outlet | |



Kecepatan keliling pada inlet (v) :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 2 \times 200}{60} = 20,94 \text{ m/s}$$

Kecepatan keliling pada outlet (v_1) :

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 2,5 \times 200}{60} = 26,18 \text{ m/s}$$

Kecepatan aliran pada inlet (V_f) → dapat ditentukan dari persamaan Debit melalui inlet sbb :

$$Q = \pi \cdot D \cdot b \cdot V_f$$

$$V_f = \frac{Q}{\pi \cdot D \cdot b} = \frac{5}{\pi \times 2 \times 0,2} = 3,98 \text{ m/s}$$

Dengan cara analog → Kecepatan aliran pada inlet ($V_{f,1}$) :

$$V_{f,1} = \frac{Q}{\pi \cdot D_1 \cdot b} = \frac{5}{\pi \times 2,5 \times 0,2} = 3,183 \text{ m/s}$$

Karena debit berarah radial pada outlet → maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol.

Kecepatan whirl pada inlet (V_w) → dapat ditentukan sbb :

$$\begin{aligned} \frac{V_w \cdot v}{g} &= H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} \\ &= H - \frac{(V_{f,1})^2}{2 \cdot g} \quad (\text{karena } V_1 = V_{f,1}) \end{aligned}$$

$$\frac{V_w \times 20,94}{9,81} = 40 - \frac{(3,183)^2}{2 \times 9,81}$$

$$V_w = 18,5 \text{ m/s}$$

Karena $V_w (=18,5)$ lebih kecil dari pada $v (= 20,94)$ → maka bentuk dari segitiga kecepatan pada inlet seperti terlihat pada gambar.

Sudut sudu pengarah pada sisi inlet (α) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet didapatkan sbb :

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{3,98}{18,5} = 0,2151$$

$$\alpha = 12,14^\circ$$

Sudut sudu pada sisi inlet (θ) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet didapatkan sbb :

$$\tan(180^\circ - \theta) = \frac{V_f}{v - V_w} = \frac{3,98}{20,94 - 18,5} = 1,631$$

$$(180^\circ - \theta) = 58,49^\circ$$

$$\theta = 121,51^\circ$$

Sudut sudu pada sisi outlet (ϕ) = ... ?

Dari segitiga kecepatan outlet didapatkan sbb :

$$\tan \phi = \frac{V_{f,1}}{v_1} = \frac{3,183}{26,18} = 0,1216$$
$$\phi = 6,93^\circ$$

4.16 Daya yang Dihasilkan oleh Turbin Reaksi

Dalam satuan HP :

$$P = \frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \quad [\text{HP}]$$

Dalam satuan Watt :

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad [\text{W}]$$

4.17 Efisiensi Turbin Reaksi

Secara umum, efisiensi dapat didefinisikan sebagai rasio antara kerja yang dilakukan dengan energi yang disuplai.

Efisiensi ada 3 macam, yaitu :

1. Efisiensi Hidrolik (Hydraulic Efficiency)
2. Efisiensi Mekanik (Mechanical Efficiency)
3. Efisiensi Keseluruhan (Overall Efficiency)

4.18 Efisiensi Hidrolik

Efisiensi Hidrolik adalah rasio antara kerja yang dilakukan pada turbin dengan energi air yang disuplai ke turbin.

$$\eta_h = \frac{\text{Kerja Yang Dilakukan} / \text{Berat Air dalam kgf}}{H}$$
$$= \frac{\frac{V_w \cdot v}{g} - \frac{V_{w,1} \cdot v_1}{g}}{H}$$

Jika debit yang mengalir ke turbin dalam arah radial \rightarrow maka kecepatan whirl pada outlet $V_{w,1} = 0$, sehingga efisiensi hidrolik menjadi :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$

4.19 Efisiensi Mekanik

Perlu diingat bahwa energi air yang disuplai ke turbin tidak seluruhnya dikonversi menjadi energi yang berguna. Namun ada sebagian energi yang hilang / digunakan untuk mengatasi gesekan pada bantalan, dsb. Sehingga efisiensi mekanik turbin merupakan rasio antara kerja aktual yang tersedia pada turbin dengan energi yang diberikan air ke turbin.

Energi air yang diberikan ke turbin (pada kasus debit aliran radial) :

$$= \frac{V_w \cdot v}{g} \cdot (w \cdot Q)$$

Sehingga :

Daya yang diberikan ke Turbin :

$$P = \frac{V_w \cdot v}{g} \cdot \left(\frac{w \cdot Q}{75} \right)$$

Dengan P = daya yang tersedia pada turbin dalam satuan HP

Efisiensi mekanik :

$$\eta_m = \frac{P}{\frac{V_w \cdot v}{g} \cdot \left(\frac{w \cdot Q}{75} \right)}$$

4.20 Efisiensi Keseluruhan

Efisiensi keseluruhan :

- merupakan ukuran prestasi turbin
- rasio antara daya yang dihasilkan turbin dengan energi yang disuplai ke turbin

$$\eta_o = \eta_h \cdot \eta_m = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H} \cdot \left(\frac{P}{\frac{V_w \cdot v}{g} \cdot \frac{w \cdot Q}{75}} \right)$$

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

Example 22-9 : Suatu turbin reaksi aliran inward mempunyai kecepatan runner tangensial 30 m/s, kecepatan aliran 3 m/s, dan kecepatan whirl 24 m/s. Dengan mengasumsikan debit berarah radial pada outlet dan efisiensi hidrolis sebesar 78%, tentukan head total pada turbin & sudut sudu masuk.

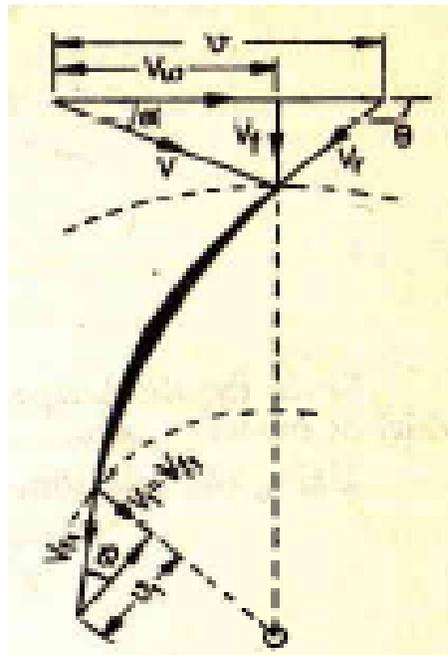
Jawab :

Kecepatan tangensial runner inlet $v = 30 \text{ m/s}$

Kecepatan aliran pada inlet $V_f = 3 \text{ m/s}$

Kecepatan whirl inlet $V_w = 24 \text{ m/s}$

Efisiensi hidrolis $hh = 78\%$



Head total pada turbin (H) = ... ?

Karena debit berarah radial pada outlet \rightarrow maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol, sehingga :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$

$$0,78 = \frac{24 \times 30}{9,81 \times H}$$

$$H = 94,1 \text{ m}$$

Sudut sudu masuk (θ) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow didapat :

$$\tan(180^\circ - \theta) = \frac{V_f}{v - V_w} = \frac{3}{30 - 24} = 0,5$$

$$(180^\circ - \theta) = 26,57^\circ$$

$$\theta = 153,43^\circ$$

Example 22-10 : Suatu turbin reaksi aliran inward yang beroperasi pada head 8 m mempunyai sudut sudu pengarah 25° dan sudut sudu pada 105° . Dengan mengasumsikan kecepatan aliran konstan & debit berarah radial, tentukan efisiensi hidrolis turbin.

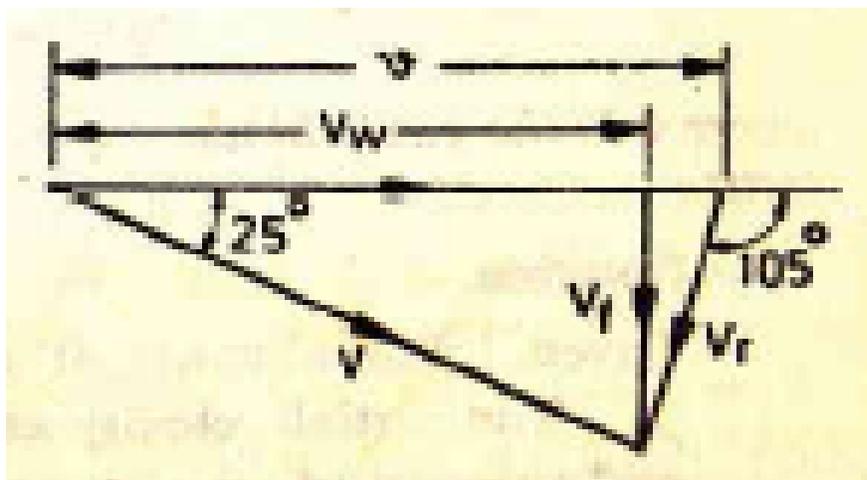
Jawab :

Head air $H = 8$ m

Sudut sudu pengarah $\alpha = 25^\circ$

Sudut sudu inlet $\beta = 105^\circ$

Kecepatan aliran outlet $V_{f,1} = V_f$



Keterangan :

η_h = efisiensi hidrolis

V = kecepatan mutlak air pada inlet

V_w = kecepatan whirl pada inlet

$$= V \cdot \cos 25^\circ = 0,9063 \cdot V$$

V_f = kecepatan aliran pada inlet

$$= V \cdot \sin 25^\circ = 0,4226 \cdot V$$

v = kecepatan tangensial pada inlet

$$v = V_w + \frac{V_f}{\tan 75^\circ} = 0,9063 \cdot V + \frac{0,4226 \cdot V}{\tan 75^\circ}$$
$$v = 1,0195 \cdot V$$

Karena debit berarah radial pada outlet \rightarrow maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol, sehingga :

$$\frac{V_w \cdot v}{g} = H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g}$$
$$= H - \frac{(V_{f,1})^2}{2 \cdot g} \quad (\text{karena } V_1 = V_{f,1})$$
$$= H - \frac{(V_f)^2}{2 \cdot g} \quad (\text{karena } V_f = V_{f,1})$$
$$\frac{0,9063 \cdot V \times 1,0195 \cdot V}{9,81} = 8 - \frac{(0,4226 \cdot V)^2}{2 \times 9,81}$$
$$V = 8,8 \text{ m/s}$$

Sehingga : efisiensi hidrolis menjadi :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$
$$= \frac{(0,9063 \times 8,8) \times (1,0195 \times 8,8)}{9,81 \times 8} = 0,912$$
$$\eta_h = 91,2 \%$$

Example 22-11 : Tunjukkan bahwa pada suatu turbin dengan sudu radial pada inlet & outlet, efisiensi hidrolik dapat dirumuskan dengan :

$$\eta_h = \frac{2}{2 + (\tan \alpha)^2}$$

Dengan sudut α adalah sudut sudu pengarah. Asumsikan kecepatan aliran konstan ($V_f = V_{f,1}$)

Jawab :

Sudu radial pada inlet & outlet sehingga :

- kecepatan tangensial pada inlet $v = V_w$
- kecepatan whirl pada outlet $\rightarrow V_{w,1} = 0$

Kecepatan aliran pada inlet $V_f = V_{f,1}$

Sudut sudu pengarah (α)

Dengan menggunakan hubungan berikut \rightarrow didapat persamaan head sbb :

$$\begin{aligned} \frac{V_w \cdot v}{g} &= H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} \\ &= H - \frac{(V_{f,1})^2}{2 \cdot g} \quad (\text{karena } V_1 = V_{f,1}) \\ &= H - \frac{(V_f)^2}{2 \cdot g} \quad (\text{karena } V_f = V_{f,1}) \\ &= H - \frac{(v \cdot \tan \alpha)^2}{2 \cdot g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H &= \frac{V_w \cdot v}{g} + \frac{v^2 \cdot (\tan \alpha)^2}{2 \cdot g} \\ &= \frac{v^2}{g} + \frac{v^2 \cdot (\tan \alpha)^2}{2 \cdot g} \quad (\text{karena } V_w = v) \end{aligned}$$

$$H = \frac{v^2}{g} \cdot \left(1 + \frac{(\tan \alpha)^2}{2} \right) = \frac{v^2}{g} \cdot \left(\frac{2 + (\tan \alpha)^2}{2} \right) \quad \text{persamaan (i)}$$

Hubungan efisiensi hidrolis :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$

$$= \frac{v^2}{g \cdot H} \quad (\text{karena: } V_w = v)$$

Dengan mensubstitusikan nilai H dari persamaan (i) ke persamaan efisiensi hidrolis di atas menjadi :

$$\eta_h = \frac{v^2}{g \cdot \left[\frac{v^2}{g} \cdot \left(\frac{2 + (\tan \alpha)^2}{2} \right) \right]}$$

$$\eta_h = \frac{2}{2 + (\tan \alpha)^2}$$

Example 22-12 : Suatu turbin reaksi aliran inward mengalirkan debit secara radial dan kecepatan aliran (V_f) konstan dan sama dengan kecepatan keluar dari suction tube. Tunjukkan bahwa efisiensi hidrolis dapat dinyatakan sebagai :

$$\eta_h = \frac{1}{1 - \frac{\frac{1}{2} \cdot (\tan \alpha)^2}{\left(\frac{\tan \alpha}{\tan \theta} \right)}}$$

Dengan α adalah sudut sudu pengarah dan θ adalah sudut sudu pada inlet.

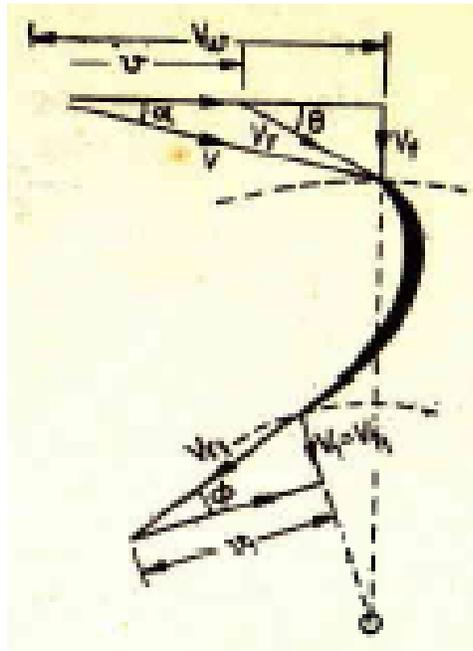
Jawab :

Debit keluar secara radial pada outlet

Kecepatan aliran pada inlet $\rightarrow V_f = V_{f,1}$

α = sudut sudu pengarah

θ = sudut sudu pada inlet



Dari segitiga kecepatan inlet → didapat :

$$V_f = V_w \cdot \tan \alpha \quad \text{pers.(i)}$$

dan

$$v = V_w - \frac{V_f}{\tan \theta} \quad \text{pers.(ii)}$$

$$= V_w - \frac{V_w \cdot \tan \alpha}{\tan \theta}$$

$$= V_w \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} \right) \quad \text{pers.(iii)}$$

Karena debit berarah radial pada outlet → maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol.

Dari hubungan berikut :

$$\frac{V_w \cdot v}{g} = H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g}$$

$$H = \frac{V_w \cdot v}{g} + \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g}$$

$$= \frac{V_w \cdot v}{g} + \frac{(V_{f,1})^2}{2 \cdot g} \quad \text{(karena } V_1 = V_{f,1}\text{)}$$

$$= \frac{V_w \cdot v}{g} + \frac{(V_f)^2}{2 \cdot g} \quad \text{(karena } V_f = V_{f,1}\text{)}$$

Dengan mensubstitusikan nilai Vf dari pers. (i) didapat :

$$H = \frac{V_w \cdot v}{g} + \frac{(V_w)^2 \cdot (\tan \alpha)^2}{2 \cdot g}$$

Dengan mensubstitusikan nilai v dari pers. (iii) didapat :

$$\begin{aligned} H &= \frac{V_w \cdot v}{g} \cdot V_w \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta}\right) + \frac{(V_w)^2 \cdot (\tan \alpha)^2}{2 \cdot g} \\ &= \frac{(V_w)^2}{g} \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} + \frac{(\tan \alpha)^2}{2}\right) \end{aligned} \quad \text{pers. (iv)}$$

Dari hubungan :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$

Substitusikan nilai v dari pers (iii) :

$$\begin{aligned} \eta_h &= \frac{V_w \cdot V_w \cdot \left[1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta}\right]}{g \cdot H} \\ &= \frac{(V_w)^2 \cdot \left[1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta}\right]}{g \cdot H} \end{aligned}$$

Substitusikan nilai H dari pers. (iv)

→ didapat hubungan untuk efisiensi hidrolis yang dimaksud.

$$\begin{aligned} \eta_h &= \frac{(V_w)^2 \cdot \left[1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta}\right]}{g \cdot \left[\frac{(V_w)^2}{g} \cdot \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} + \frac{(\tan \alpha)^2}{2}\right)\right]} \\ &= \frac{1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta}}{1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} + \frac{(\tan \alpha)^2}{2}} \\ &= \frac{1}{1 - \frac{1/2 \cdot (\tan \alpha)^2}{\left(\frac{\tan \alpha}{\tan \theta}\right)}} \end{aligned}$$

Example 22-13 : Tentukan diameter rata-rata dan sudut sudu pada inlet & outlet dari suatu turbin reaksi dengan data-data sbb :

Daya keluaran = 20.000 HP

Kecepatan putar = 300 rpm

Head air = 120 m

Rasio diameter dalam terhadap diameter luar = 0,6

Panjang aksial sudu pada inlet = 0,1 x diameter yang terkait

Rasio aliran = 0,15

Efisiensi hidrolik = 88 % (berdasarkan segitiga kecepatan)

Efisiensi keseluruhan = 85 %

Asumsikan debit berarah radial, kecepatan aliran konstan, dan luas yang ditempati oleh tebal sudu sebesar 5 % dari luas aliran.

Jawab :

Daya keluaran $P = 20.000 \text{ HP}$

Kecepatan putar $N = 300 \text{ rpm}$

Head air $H = 120 \text{ m}$

Rasio diameter dalam terhadap diameter luar = 0,6

$$D_1 = 0,6 \cdot D$$

Panjang aksial sudu pada inlet $\rightarrow b = 0,1 \times D$

Efisiensi hidrolik $\eta_h = 88 \%$

(berdasarkan segitiga kecepatan)

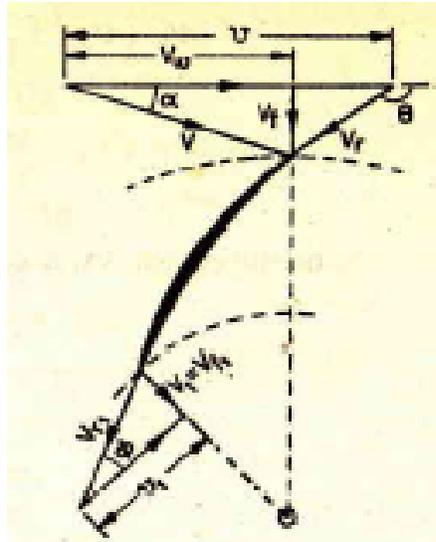
Efisiensi keseluruhan $\eta_o = 85 \%$

Debit berarah radial

Kecepatan aliran konstan pada outlet

$$V_{f,1} = V_f = 7,28 \text{ m/s}$$

Luas yang ditempati oleh tebal sudu sebesar 5 % dari luas aliran



Kecepatan aliran (V_f) :

$$V_f = 0,15 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 120} = 7,28 \text{ m/s}$$

Rasio aliran :

$$\text{Rasio Aliran} = \frac{V_f}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 0,15$$

Diameter inlet (D) = ... ?

Debit dapat ditentukan dari hubungan efisiensi sbb :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$0,85 = \frac{20.000}{\left(\frac{1000 \times Q \times 120}{75} \right)}$$

$$Q = 14,706 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Diameter inlet (D) dapat ditentukan dari perumusan debit pada inlet sbb (5% luas ditempati oleh tebal sudu) :

$$Q = \pi \cdot D \cdot b \cdot V_f \cdot (1 - 5\%)$$

$$14,706 = \pi \cdot D \cdot (0,1 \cdot D) \cdot 7,28 \cdot 0,95$$

$$D = 2,6 \text{ m}$$

Diameter outlet (D1) = ... ?

$$D_1 = 0,6 \cdot D = 0,6 \cdot 2,6 = 1,56 \text{ m}$$

Sudut sudu pengarah pada sisi inlet (α) = ... ?

Kecepatan keliling pada inlet :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \cdot 2,6 \cdot 300}{60} = 40,84 \text{ m/s}$$

Karena debit berarah radial pada outlet \rightarrow maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol. Sehingga kecepatan whirl pada inlet sbb :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$

$$0,88 = \frac{V_w \cdot 40,84}{9,81 \cdot 120}$$

$$V_w = 25,37 \text{ m/s}$$

Karena $V_w (= 25,37)$ lebih kecil dari pada $v (= 40,84) \rightarrow$ maka bentuk segitiga kecepatan seperti terlihat pada gambar.

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow sudut sudu pengarah (α) :

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{7,28}{25,37} = 0,2869$$

$$\alpha = 16^\circ$$

Sudut sudu pada sisi inlet (θ) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow sudut sudu inlet (θ) :

$$\tan(180^\circ - \theta) = \frac{V_f}{v - V_w} = \frac{7,28}{40,84 - 25,37} = 0,4706$$

$$(180^\circ - \theta) = 25,2^\circ$$

$$\theta = 154,8^\circ$$

Sudut sudu pada sisi outlet (ϕ) = ... ?

Kecepatan keliling pada outlet :

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 1,56 \times 300}{60} = 24,5 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan outlet \rightarrow sudut sudu outlet (ϕ) :

$$\tan \phi = \frac{V_{f,1}}{v_1} = \frac{7,28}{24,5} = 0,2971$$

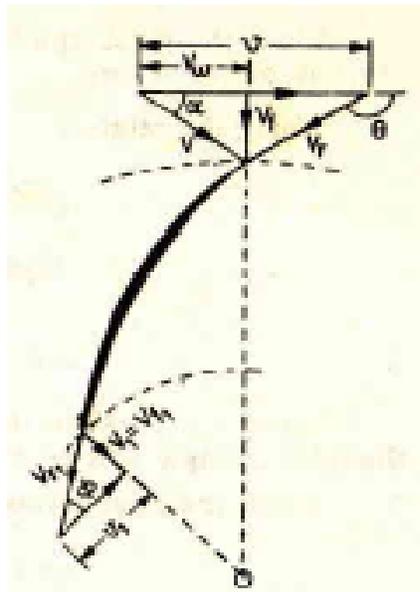
$$\phi = 16,55^\circ$$

Example 22-14 : Suatu turbin aliran campur inward dengan debit berarah radial dibutuhkan untuk menghasilkan 2.580 kW pada head 30 m dengan efisiensi keseluruhan 82 %. Kecepatan keliling wheel sebesar $0,95 (2 \cdot g \cdot H)^{1/2}$ dan kecepatan aliran sebesar $0,30 (2 \cdot g \cdot H)^{1/2}$. Jika wheel berputar pada 300 rpm dan rugi-rugi hidrolis sebesar 12 %, tentukan :

- Debit turbin
- Sudut sudu pengarah
- Sudut sudu pada inlet
- Diameter wheel pada inlet

Jawab :

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Daya turbin | $P = 2.580 \text{ kW}$ |
| Head air | $H = 30 \text{ m}$ |
| Efisiensi keseluruhan | $\eta_o = 82\%$ |
| Rugi-rugi hidrolis | $= 12 \%$ |
| Efisiensi hidrolis | $\eta_h = (100 - 12) = 88 \%$ |
| Kecepatan putar | $N = 300 \text{ rpm}$ |



Kecepatan keliling wheel (v) :

$$v = 0,95 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,95 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 30} \text{ m/s}$$

$$v = 23,04 \text{ m/s}$$

Kecepatan aliran pada inlet (V_f) :

$$V_f = 0,3 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,3 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 30} \text{ m/s}$$

$$V_f = 7,28 \text{ m/s}$$

Debit turbin (Q) = ... ?

$$\eta_o = \frac{P}{9,81 \cdot Q \cdot H}$$

$$0,82 = \frac{2.580}{9,81 \times Q \times 30}$$

$$Q = 10,69 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sudut sudu pengarah (α) = ... ?

Karena debit berarah radial pada outlet \rightarrow maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol. Sehingga kecepatan whirl pada inlet sbb :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$

$$0,88 = \frac{V_w \times 23,4}{9,81 \times 30}$$

$$V_w = 11,07 \text{ m/s}$$

Karena V_w (= 11,27) lebih kecil dari pada v (= 23,4) \rightarrow maka bentuk segitiga kecepatan pada inlet seperti terlihat pada gambar.

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow sudut sudu pengarah (α) :

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{7,28}{11,07} = 0,658$$

$$\alpha = 33,33^\circ$$

Sudut sudu pada inlet (θ) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow sudut sudu pada inlet (θ) :

$$\tan(180^\circ - \theta) = \frac{V_f}{v - V_w} = \frac{7,28}{(23,04 - 11,07)} = 0,608$$

$$(180^\circ - \theta) = 31,3^\circ$$

$$\theta = 148,7^\circ$$

Diameter wheel pada inlet (D) = ... ?

Dari perumusan kecepatan keliling wheel pada inlet didapat :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

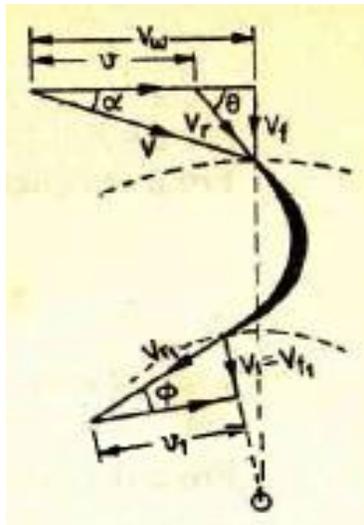
$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N} = \frac{60 \times 23,04}{\pi \times 300} = 1,467 \text{ m}$$

Example 22-15 : Dengan menggunakan data di bawah, tentukan dimensi-dimensi utama dan sudut-sudut sudu dari suatu turbin reaksi aliran inward.

| | | |
|-----------------------|-----------|--|
| Head netto | = 65 m | $\frac{\text{Lebar Wheel pada inlet}}{\text{Diameter Wheel pada inlet}} = 0,1$ |
| Kecepatan putar | = 700 rpm | |
| Efisiensi keseluruhan | = 85 % | |
| Rasio aliran | = 0,18 | $\frac{\text{Diameter dalam}}{\text{Diameter luar}} = \frac{1}{2}$ |

Jawab :

| | |
|----------------------------------|-----------------------|
| Daya yang dihasilkan | $P = 400 \text{ HP}$ |
| Head netto | $H = 65 \text{ m}$ |
| Kecepatan putar | $N = 700 \text{ rpm}$ |
| Efisiensi keseluruhan | $\eta_o = 85 \%$ |
| Efisiensi hidrolis | $\eta_h = 94 \%$ |
| Debit berarah radial pada outlet | |



Rasio Aliran :

$$\text{Rasio Aliran} = \frac{V_r}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 0,18$$

Kecepatan aliran pada inlet (V_f) :

$$V_f = 0,18 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = 0,18 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 65}$$
$$V_f = 6,43 \text{ m/s}$$

Lebar Wheel pada Inlet (b) :

$$\frac{\text{Lebar Wheel pada inlet}}{\text{Diameter Wheel pada inlet}} = \frac{b}{D} = 0,1$$
$$b = 0,1 \cdot D$$

Diameter dalam (D_1) :

$$\frac{\text{Diameter dalam}}{\text{Diameter luar}} = \frac{D_1}{D} = \frac{1}{2}$$
$$D_1 = \frac{D}{2}$$

Kecepatan aliran pada outlet ($V_{f,1}$) :

$$V_{f,1} = V_f = 6,43 \text{ m/s}$$

Diameter pada inlet (D) = ... ?

Debit aliran (Q) → dapat ditentukan dari :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{1000 \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$
$$0,85 = \frac{400}{\left(\frac{1000 \times Q \times 65}{75} \right)}$$
$$Q = 0,543 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sehingga : Diameter pada inlet (D) = ... ?

$$Q = \pi \cdot D \cdot b \cdot V_f$$
$$0,543 = \pi \times D \times (0,1 \cdot D) \times 6,43$$
$$D = 0,52 \text{ m} = 52 \text{ cm}$$

Diameter pada outlet (D₁) = ... ?

$$D_1 = \frac{D}{2} = \frac{0,52}{2} = 0,26 \text{ m} = 26 \text{ cm}$$

Lebar Wheel pada Inlet (b) = ... ?

$$b = 0,1 \cdot D = 0,1 \times 52 = 5,2 \text{ cm}$$

Lebar wheel pada outlet (b₁) = ... ?

$$\pi \cdot D \cdot b \cdot V_f = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot V_{f,1}$$
$$\pi \times 0,52 \times 5,2 \times 6,43 = \pi \times 0,26 \times b_1 \times 6,43$$
$$b_1 = 10,4 \text{ cm}$$

Sudut sudu pengarah (α) = ... ?

Kecepatan keliling pada inlet :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 0,52 \times 700}{60} = 19,06 \text{ m/s}$$

Karena debit berarah radial pada outlet → maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol.

Sehingga : Kecepatan whirl pada inlet :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$
$$0,94 = \frac{V_w \times 19,06}{9,81 \times 65}$$
$$V_w = 31,45 \text{ m/s}$$

Karena $V_w (= 31,4)$ lebih besar dari $v (= 19,05) \rightarrow$ maka bentuk segitiga kecepatan seperti terlihat pada gambar.

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow didapat sudut sudu pengarah (α) sbb :

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{6,43}{31,45} = 0,2044$$

$$\alpha = 11,55^\circ$$

Sudut sudu pada Inlet (θ) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet didapat sbb :

$$\tan \theta = \frac{V_f}{V_w - v} = \frac{6,43}{31,4 - 19,05} = 0,5206$$

$$\theta = 27^\circ 30'$$

Sudut sudu pada Outlet (ϕ) = ... ?

Kecepatan keliling pada outlet :

$$v_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 0,26 \times 700}{60} = 9,53 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan outlet didapat sbb :

$$\tan \phi = \frac{V_{f,1}}{v_1} = \frac{6,43}{9,53} = 0,6747$$

$$\phi = 34^\circ$$

Example 22-16 : Suatu turbin reaksi aliran outward mempunyai kecepatan tangensial pada rim dalamnya sebesar 12 m/s dan rasio radius 0,8. Turbin diletakkan 1 m di bawah permukaan air pada bagian tail race-nya. Sudut sudu inlet 90° dan sudut sudu outlet 20° . Kecepatan radial aliran sebesar 4 m/s. Dengan mengabaikan rugi-rugi gesekan dan mengasumsikan kecepatan keluar radial, tentukan :

- Sudut sudu pengarah
- Kecepatan aliran dari sudu pengarah
- Head total
- Efisiensi hidrolis

Jawab :

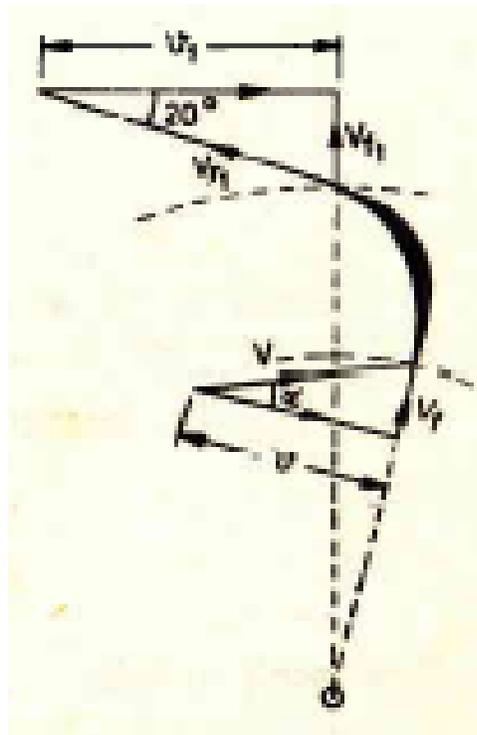
Kecepatan tangensial pada rim dalam $v = 12 \text{ m/s}$

Sudut wheel pada inlet $\theta = 90^\circ$

Sudut wheel pada outlet $\phi = 20^\circ$

Kecepatan aliran pada inlet $V_f = 4 \text{ m/s}$

$$\text{Rasio radius} = \frac{r}{r_1} = 0,8$$



Sehingga : Kecepatan pada rim luar (v_1) :

$$v_1 = 12 \times \frac{1}{0,8} = 15 \text{ m/s}$$

Sudut sudu pengarah (α) = ... ?

Dari segitiga kecepatan inlet \rightarrow didapat sbb :

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{V_f}{v} = \frac{4}{12} = 0,3333$$

$$\alpha = 18,43^\circ$$

Kecepatan aliran dari pengarah (V) = ... ?

Dari geometri segitiga kecepatan inlet \rightarrow didapat sbb :

$$V = \sqrt{v^2 + (V_f)^2} = \sqrt{12^2 + 4^2} = 12,65 \text{ m/s}$$

Head Total (H) = ... ?

Dari geometri segitiga kecepatan outlet \rightarrow kecepatan aliran ($V_{f,1}$) sbb :

$$V_{f,1} = V_1 = v \cdot \tan 20^\circ = 15 \times 0,364 = 5,46 \text{ m/s}$$

$$\text{Kerja Yang Dilakukan} = \frac{V_w \cdot v}{g} = \frac{12 \times 12}{9,81} = 14,68 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$$

Sehingga : Head Total pada inlet (H) sbb :

Head Total = Energi pada Outlet + Kerja Yang Dilakukan

$$= \left(\frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} + 1 \right) + 14,68 \quad (\text{karena turbin diletakkan 1 m di bawah tail race})$$

$$= \left(\frac{5,46^2}{2 \times 9,81} + 1 \right) + 14,68 = 17,2$$

Efisiensi hidrolik = ... ?

Karena turbin diletakkan 1 meter di bawah permukaan air pada tail race → maka head netto air tersedia untuk turbin sbb :

$$H = 17,2 - 1 = 16,2 \text{ m}$$

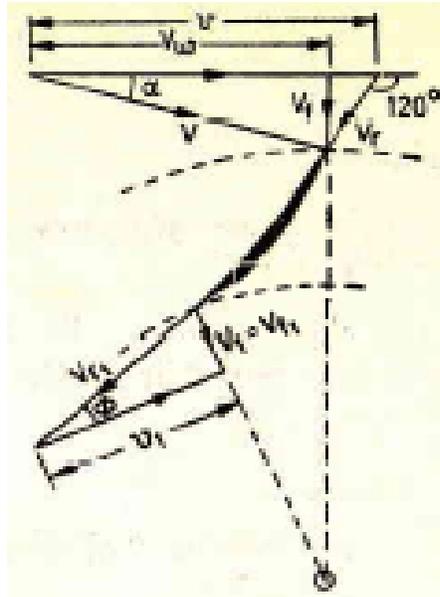
Efisiensi hidrolik ditentukan sbb :

$$\begin{aligned}\eta_h &= \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H} \\ &= \frac{12 \times 12}{9,81 \times 16,2} = 0,906 \\ &= 90,6 \%\end{aligned}$$

Example 22-17 : Suatu turbin reaksi disuplai dengan debit 100 m³/s pada head rata-rata 150 m. Diameter runner 3,6 m pada inlet dan 2,4 m pada outlet. Sudut sudu inlet sebesar 120°. Dengan mengasumsikan kecepatan radial outlet pada 15 m/s, lebar wheel konstan, dan efisiensi hidrolik 90 %, tentukan daya yang dihasilkan dalam HP dan kecepatan putar dari turbin.

Jawab :

| | |
|--------------------|---------------------------|
| Debit turbin | Q = 100 m ³ /s |
| Head air | H = 150 m |
| Diameter luar | D = 3,6 m |
| Diameter dalam | D ₁ = 2,4 m |
| Sudut sudu inlet | θ = 120° |
| Kecepatan outlet | V ₁ = 15 m/s |
| Lebar inlet | b = b ₁ |
| Efisiensi hidrolik | η _h = 90 % |



Daya turbin yang dihasilkan dalam HP (P) = ... ?

Asumsi : $\eta_o = \eta_h = 0,9$

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$0,9 = \frac{P}{\left(\frac{1000 \times 100 \times 150}{75} \right)}$$

$$P = 1.800.000 \text{ HP}$$

Kecepatan putar turbin (N) = ... ?

Karena debit berarah radial \rightarrow kecepatan aliran pada outlet sbb :

$$V_{f,1} = V_1 = 15 \text{ m/s}$$

Kecepatan aliran pada inlet \rightarrow didapat dari persamaan bahwa debit inlet & outlet sama sehingga :

$$\pi \cdot D \cdot b \cdot V_f = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot V_{f,1}$$

$$\pi \times 3,6 \times b \times V_f = \pi \times 2,4 \times b_1 \times 15$$

$$V_f = 10 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan inlet → perumusan kecepatan whirl inlet :

$$(v - V_w) = \frac{V_f}{\tan 60^\circ} = \frac{10}{1,732} = 5,77 \text{ m/s}$$

$$V_w = v - 5,77$$

Karena debit berarah radial pada outlet → maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol.

Sehingga kecepatan tangensial wheel pada inlet (v) sbb :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$

$$0,9 = \frac{(v - 5,77) \cdot v}{9,81 \times 150}$$

$$v^2 - 5,77 \cdot v - 1324 = 0$$

$$v = \frac{5,77 \pm \sqrt{5,77^2 + 4 \times 1324}}{2} = 39,4 \text{ m/s}$$

Kecepatan putar (N) → didapatkan dari perumusan kecepatan wheel pada inlet (v) sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

$$N = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{60 \times 39,4}{\pi \times 3,6} = 209,02 \text{ rpm}$$

Example 22-18 : Air dimasukkan ke suatu turbin reaksi aliran inward yang berputar pada 180 rpm dengan kecepatan aliran 3 m/s. Diameter wheel pada inlet 1 m dan lebar wheel inlet 13,5 cm. Dengan mengasumsikan kecepatan aliran konstan dan debit berarah radial pada inlet & outlet, tentukan :

- Kerja yang dilakukan per kgf air
- Daya turbin yang dihasilkan dalam HP
- Head air
- Efisiensi hidrolis

Jawab :

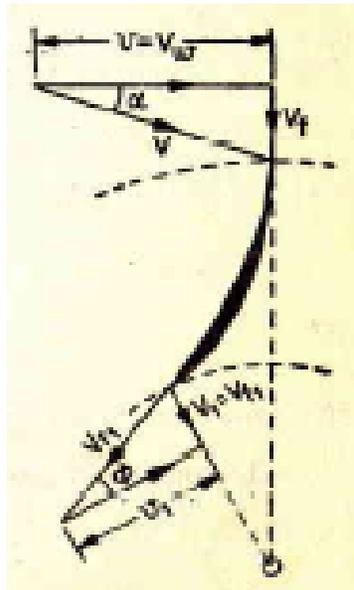
Kecepatan putar $N = 180 \text{ rpm}$

Kecepatan aliran pada inlet $V_{f,1} = 3 \text{ m/s}$

Diameter wheel pada inlet $D = 1 \text{ m}$

Lebar wheel pada inlet $b = 13,5 \text{ cm}$
 $= 0,135 \text{ m}$

Kecepatan aliran outlet $\rightarrow V_{f,1} = V_f = 3 \text{ m/s}$



Kerja yang dilakukan per kgf air = ... ?

Kecepatan tangensial wheel pada inlet (v) :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 1 \times 180}{60} = 9,42 \text{ m/s}$$

Karena debit berarah radial pada inlet → maka kecepatan whirl pada inlet :

$$V_w = v = 9,42 \text{ m/s}$$

Karena debit berarah radial juga pada outlet → maka kecepatan whirl pada outlet sama dengan nol.

Kerja yang dilakukan per kgf air → didapat dari hubungan sbb :

$$\begin{aligned} \frac{\text{Kerja Yang Dilakukan}}{\text{kgf}} &= \frac{V_w \cdot v}{g} \\ &= \frac{9,42 \times 9,42}{9,81} = 9,05 \text{ kgf} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Daya turbin yang dihasilkan dalam HP (P) = ... ?

Debit pada turbin (Q) :

$$Q = \pi \cdot D \cdot b \cdot V_f = \pi \times 1 \times 0,135 \times 3 = 1,272 \text{ m}^3/\text{s}$$

Berat air yang mengalir per detik :

$$\frac{\text{Berat Air Yang Mengalir}}{\text{detik}} = 1000 \times 1,272 = 1.272 \text{ kgf/s}$$

Sehingga : Daya turbin yang dihasilkan dalam HP (P) sbb :

$$P = \frac{\left(\frac{\text{Berat Air Yang Mengalir}}{\text{detik}} \right) \times \left(\frac{\text{Kerja Yang Dilakukan}}{\text{kgf}} \right)}{75}$$

$$P = \frac{1272 \times 9,05}{75} = 153,5 \text{ HP}$$

Head air (H) = ... ?

$$\begin{aligned}\frac{V_w \cdot v}{g} &= H - \frac{(V_1)^2}{2 \cdot g} \\ &= H - \frac{(V_{f,1})^2}{2 \cdot g} && \text{(karena: } V_1 = V_{f,1}\text{)} \\ &= H - \frac{(V_f)^2}{2 \cdot g} && \text{(karena: } V_{f,1} = V_f\text{)}\end{aligned}$$

$$\frac{9,42 \times 9,42}{9,81} = H - \frac{3^2}{2 \times 9,81}$$

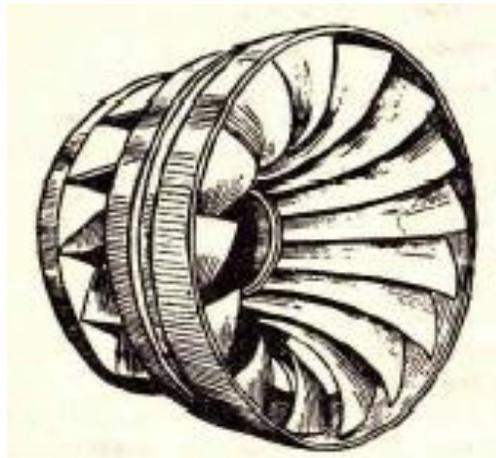
$$H = 9,5 \text{ m}$$

Efisiensi hidrolik = ... ?

$$\begin{aligned}\eta_h &= \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H} \\ &= \frac{9,42 \times 9,42}{9,81 \times 9,5} = 0,9522 \\ &= 95,22 \%\end{aligned}$$

4.21 Turbin Francis

Turbin Francis adalah turbin reaksi aliran inward yang mempunyai debit radial pada outlet. Turbin ini adalah turbin pertama (turbin reaksi jenis aliran inward) yang dirancang oleh Francis. Turbin ini paling banyak digunakan sekarang untuk memproduksi daya dengan head yang sedang / medium. Turbin Francis modern mempunyai aliran campur (kombinasi aliran radial & aksial). Runner dari turbin Francis modern dapat dilihat pada gambar.



Tinggi (atau panjang) runner tergantung pada kecepatan spesifiknya. Turbin Francis yang mempunyai kecepatan spesifik yang tinggi mempunyai runner yang lebih panjang daripada runner dengan kecepatan spesifik yang kecil.

Runner dari turbin Francis dapat dicor atau dapat dibuat dari plat baja yang dilas atau logam non-fero seperti bronze jika air tidak murni secara kimiawi & jika rentan terhadap korosi.

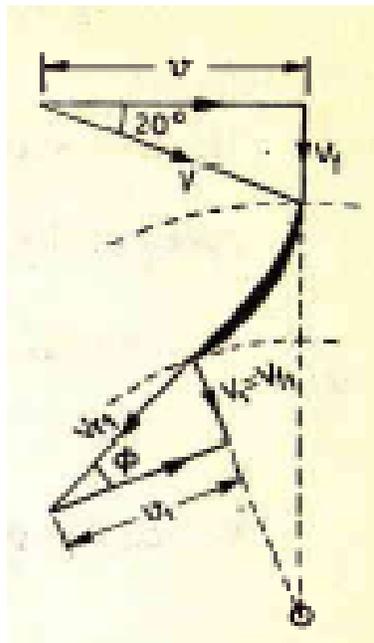
Semua persamaan hubungan untuk menentukan berbagai sudut & data-data lain yang digunakan pada turbin reaksi aliran inward & outward digunakan juga untuk mendesai turbin Francis.

Example 22-19 : Suatu turbin Francis yang bekerja pada head 14 m mempunyai sudut sudu pengarah 20° dan sudu radial pada inlet. Rasio diameter inlet terhadap outlet $3/2$. Kecepatan

aliran air pada sisi keluar 4 m/s. Dengan mengasumsikan kecepatan aliran konstan, tentukan kecepatan keliling air pada inlet dan sudut sudu pada outlet.

Jawab :

| | |
|-------------------------|---------------------------|
| Head air | $H = 14 \text{ m}$ |
| Sudut sudu pengarah | $\alpha = 20^\circ$ |
| Sudut sudu inlet | $\theta = 90^\circ$ |
| Rasio diameter | $D = (3/2) \cdot D_1$ |
| Kecepatan aliran outlet | $V_{f,1} = 4 \text{ m/s}$ |
| Kecepatan aliran inlet | $V_f = V_{f,1}$ |



Kecepatan keliling wheel pada inlet (v) = ... ?

Dari segitiga kecepatan didapat sbb :

$$\tan 20^\circ = \frac{V_f}{v}$$

Sudut sudu pada outlet (ϕ) = ? (karena $V_f = V_{f,1} = 4 \text{ m/s}$)

$$v = 10,99 \text{ m/s}$$

Karena ini adalah turbin Francis → maka debit akan berarah radial.

Karena diameter luar turbin = (2/3) diameter dalam → maka kecepatan keliling wheel pada outlet sbb :

$$v_1 = \frac{2 \cdot v}{3} = \frac{2}{3} \times 10,99 = 7,33 \text{ m/s}$$

Dari segitiga kecepatan outlet → Sudut sudu pada outlet (ϕ) sbb :

$$\tan \phi = \frac{V_{f,1}}{v_1} = \frac{4}{7,33} = 0,5457$$

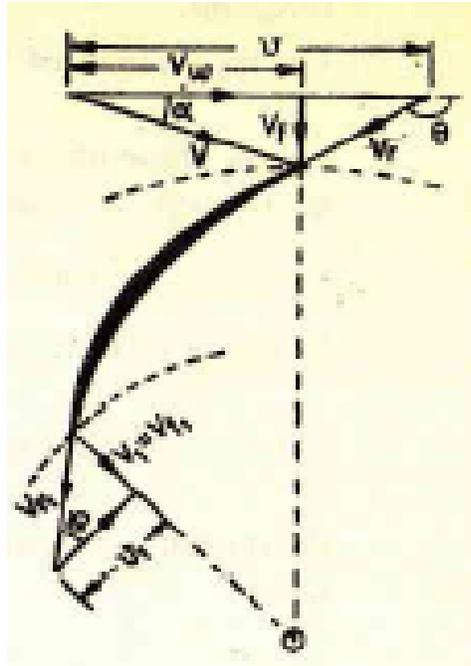
$$\phi = 28,62^\circ$$

Example 22-20 : Suatu turbin Francis yang mempunyai efisiensi keseluruhan 75 % diharapkan menghasilkan daya 180 HP pada head air 9 m dan beroperasi pada 120 rpm. Kecepatan keliling wheel $3,47 \cdot (H)^{1/2}$ dan kecepatan aliran pada inlet $1,15 \cdot (H)^{1/2}$. Jika rugi-rugi hidrolis dalam turbin sebesar 20 % dari energi yang tersedia, tentukan :

- Sudut sudu pengarah pada inlet
- Sudut sudu wheel pada inlet
- Diameter wheel

Jawab :

| | |
|-----------------------|-------------------------------|
| Efisiensi keseluruhan | $\eta_o = 75 \%$ |
| Daya yang dihasilkan | $P = 180 \text{ HP}$ |
| Kecepatan putar | $N = 120 \text{ rpm}$ |
| Rugi-rugi hidrolis | $= 20 \%$ |
| Efisiensi hidrolis | $\eta_h = (100 - 20) = 80 \%$ |



Kecepatan keliling wheel pada inlet (v) :

$$\begin{aligned} v &= 3,47 \cdot \sqrt{H} \\ &= 3,47 \cdot \sqrt{9} = 10,41 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Kecepatan aliran pada inlet (V_f) :

$$\begin{aligned} V_f &= 1,15 \cdot \sqrt{H} \\ &= 1,15 \cdot \sqrt{9} = 3,45 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sudut sudu pengarah pada inlet (α) :

Kecepatan whirl pada inlet \rightarrow didapat dari hubungan sbb :

$$\begin{aligned} \eta_h &= \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H} \\ 0,8 &= \frac{V_w \cdot 10,41}{9,81 \cdot 9} \\ V_w &= 6,8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Karena $V_w (= 6,8)$ kurang dari pada $v (= 10,41) \rightarrow$ maka bentuk segitiga kecepatan seperti pada gambar.

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{3,45}{6,8} = 0,5074$$
$$\alpha = 26,9^\circ$$

Sudut sudu wheel pada inlet (θ) :

Dari segitiga kecepatan inlet didapat sbb :

$$\tan(180^\circ - \theta) = \frac{V_f}{v - V_w} = \frac{3,45}{(10,41 - 6,8)} = 0,9557$$
$$(180^\circ - \theta) = 43,7^\circ$$
$$\theta = 136,3^\circ$$

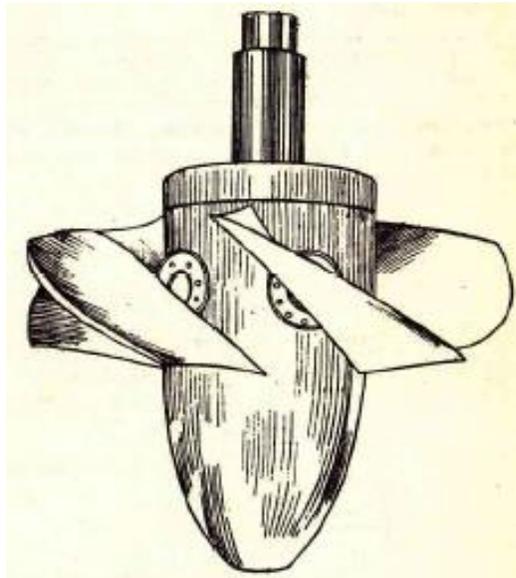
Diameter wheel (D) = ... ?

Dari rumus kecepatan keliling wheel pada inlet didapat sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$
$$D = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot N} = \frac{60 \times 10,41}{\pi \times 120} = 1,66 \text{ m}$$

4.22 Turbin Kaplan

Turbin Kaplan adalah turbin reaksi jenis aliran aksial dimana aliran air sejajar dengan poros turbin. Turbin Kaplan digunakan dimana jika debit air besar pada head air yang rendah.



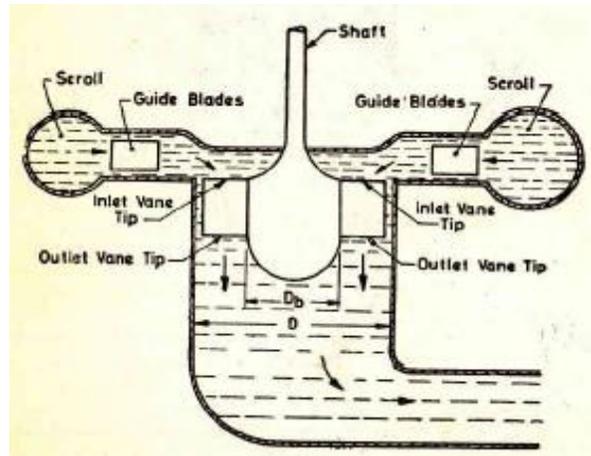
Runner dari turbin Kaplan menyerupai propeler suatu kapal. Hal ini mengapa turbin Kaplan juga disebut turbin propeler. Air dari aliran yang bergulung (scroll flow) melewati sudu pengarah (guide blade) & selanjutnya ke sudu (vane). Air saat melewati sudu akan memberikan sejumlah gaya ke turbin yang menyebabkan poros turbin berputar.

Runner dari turbin Kaplan modern mempunyai 2 perbedaan utama jika dibandingkan dengan turbin Francis, yaitu :

1. Pada runner turbin Francis → air masuk secara radial.
Sedangkan pada runner turbin Kaplan → air menumbuk blade secara aksial.
2. Pada runner turbin Francis → jumlah blade umumnya antara 16 dan 24,
Sedangkan pada runner turbin Kaplan → jumlah blade umumnya antara 3 hingga 8.
Ini akan mereduksi tahanan gesekan pada air.

Runner dari suatu turbin Kaplan → dapat dilihat di gambar.

Blade dari runner suatu turbin Kaplan dapat diatur dengan mengatur luas laluan antara 2 blade.



Runner dari suatu turbin Kaplan dikenal sebagai Boss yang merupakan perpanjangan dari poros (lihat gambar)

Keterangan :

D = diameter turbin

D_b = diameter boss

V_f = kecepatan aliran pada sisi inlet

Debit air yang melalui turbin sbb :

$$Q = V_f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - (D_b)^2)$$

Semua notasi pada turbin Kaplan sama dengan notasi-notasi pada turbin rekasi aliran inward & outward. Semua hubungan-hubungan persamaan pada turbin rekasi inward & outward → juga berlaku pada turbin Kaplan.

Tabel berikut memberikan rasio antara Boss dengan Diameter Luar (dikenal sebagai Hub Ratio) dan jumlah blade dari turbin Kaplan untuk suatu nilai head air yang diberikan.

Table 22-1

| Head in metres | 5 | 20 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|-----------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| $\frac{D_b}{D}$ | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.55 | 0.6 | 0.7 |
| No. of blades | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |

Example 22-21 : Suatu turbin Kaplan yang beroperasi pada head netto 20 m menghasilkan daya 50.000 HP dengan efisiensi keseluruhan 86 %. Rasio kecepatan sebesar 2,0 dan rasio aliran sebesar 0,60. Diameter hub dari wheel 0,35 kali diameter luar wheel. Tentukan diameter dan kecepatan putar turbin.

Jawab :

Head $H = 20 \text{ m}$
 Daya yang dihasilkan $P = 50.000 \text{ HP}$
 Efisiensi keseluruhan $\eta_o = 86 \% = 0,86$
 Diameter hub $D_b = 0,35 \cdot D$

$$\text{Rasio Kecepatan} = \frac{v}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 2,0$$

$$\text{sehingga : } v = 2,0 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 20} = 39,6 \text{ m/s}$$

$$\text{Rasio Aliran} = \frac{V_f}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 0,60$$

$$\text{sehingga : } V_f = 0,60 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 20} = 11,89 \text{ m/s}$$

Diameter turbin (D) = ... ?

Debit turbin (Q) dapat ditentukan sbb :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75}\right)}$$
$$0,86 = \frac{50.000}{\left(\frac{1000 \times Q \times 20}{75}\right)}$$
$$Q = 218 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diameter turbin (D) dapat ditentukan sbb :

$$Q = V_f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - [D_b]^2]$$
$$218 = 11,89 \times \frac{\pi}{4} \times [D^2 - [0,35 \cdot D]^2]$$
$$D = 5,16 \text{ m}$$

Kecepatan putar turbin (N) = ... ?

Dari rumus kecepatan keliling turbin pada inlet didapat :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$
$$N = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{60 \times 39,6}{\pi \times 5,16} = 146,57 \text{ rpm}$$

Example 22-22 : Tentukan kecepatan putar dan diameter runner dari suatu turbin Kaplan yang mempunyai spesifikasi sbb :

Daya yang dihasilkan = 15.400 HP
 Head rata-rata = 4,3 m
 Efisiensi keseluruhan = 90 %

Asumsikan :

- diameter boss dari runner = 0,3 . Diameter runner
- rasio kecepatan = 2
- rasio aliran = 0,65

Jawab :

Daya yang dihasilkan $P = 15.400 \text{ HP}$
 Head rata-rata $H = 4,3 \text{ m}$
 Efisiensi keseluruhan $\eta_o = 90 \%$
 Diameter boss $D_b = 0,3 \cdot D$

$$\text{Rasio Kecepatan} = \frac{v}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 2,0$$

$$\text{sehingga : } v = 2,0 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 4,3} = 18,37 \text{ m/s}$$

$$\text{Rasio Aliran} = \frac{V_f}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 0,60$$

$$\text{sehingga : } V_f = 0,60 \cdot \sqrt{2 \times 9,81 \times 4,3} = 5,51 \text{ m/s}$$

Diameter turbin (D) = ... ?

Debit aliran (Q) ditentukan sbb :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$0,9 = \frac{15.400}{\left(\frac{1000 \times Q \times 4,3}{75} \right)}$$

$$Q = 298,45 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diameter turbin (D) → ditentukan dari perumusan sbb :

$$Q = V_f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - [D_b]^2]$$

$$298,45 = 5,51 \times \frac{\pi}{4} \times [D^2 - [0,3 \cdot D]^2]$$

$$D = 8,71 \text{ m}$$

Kecepatan putar turbin (N) = ... ?

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

$$N = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{60 \times 18,37}{\pi \times 8,71} = 40,28 \text{ rpm}$$

Example 22-23 : Suatu runner dari turbin propeler mempunyai diameter luar 4,5 m dan diameter dalam 2 m serta dapat menghasilkan daya 28.000 HP jika berputar pada 140 rpm pada head 22 m. Efisiensi hidrolik sebesar 94 % dan efisiensi keseluruhan 80 %. Tentukan debit turbin dan sudut sudu pengarah pada inlet.

Jawab :

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Diameter luar | D = 4,5 m |
| Diameter dalam | D _b = 2 m |
| Daya yang dihasilkan | P = 28.000 HP |
| Kecepatan putar | N = 140 rpm |
| Head | H = 20 m |
| Efisiensi hidrolik | η _h = 94 % |
| Efisiensi keseluruhan | η _o = 88 % |

Debit turbin (Q) = ... ?

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75}\right)}$$
$$0,9 = \frac{28.000}{\left(\frac{1000 \times Q \times 20}{75}\right)}$$
$$Q = 116,67 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sudut sudu pengarah pada inlet (α) :

Kecepatan keliling pada inlet (v) :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60} = \frac{\pi \times 4,5 \times 140}{60} = 32,99 \text{ m/s}$$

Kecepatan whirl pada inlet (V_w) :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$
$$0,94 = \frac{V_w \times 32,99}{9,81 \times 20}$$
$$V_w = 5,59 \text{ m/s}$$

Kecepatan aliran pada inlet ditentukan dari rumus debit sbb :

$$Q = V_f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D^2 - [D_b]^2]$$
$$116,67 = V_f \times \frac{\pi}{4} \times [4,5^2 - 2,5^2]$$
$$V_f = 10,61 \text{ m/s}$$

Sudut sudu pengarah pada inlet (α) ditentukan dari segitiga kecepatan inlet sbb :

$$\tan \alpha = \frac{V_f}{V_w} = \frac{10,61}{5,59} = 1,898$$

$$\alpha = 62,22^\circ$$

4.23 Draft Tube

Draft Tube adalah suatu pipa yang menghubungkan turbin dengan tail race atau outlet channel.

Suatu draft tube mempunyai 2 fungsi penting sbb :

1. Draft tube memungkinkan turbin diletakkan di atas tail race sehingga turbin dapat diinspeksi dengan baik.
2. Draft tube untuk mengkonversi energi kinetik air $[(V_1)^2 / (2.g)]$ menjadi energi tekanan.

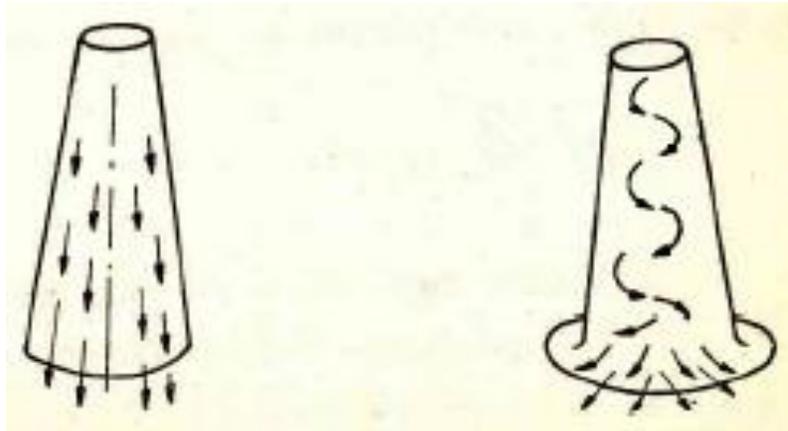
4.24 Jenis-Jenis Draft Tube

Ada beberapa jenis draft tube, di antaranya yaitu :

1. Conical Draft Tube
2. Elbow Draft Tube

4.25 Conical Draft Tube

Pada conical draft tube \rightarrow diameter tube secara gradual naik dari sisi outlet runner menuju channel (lihat gambar)

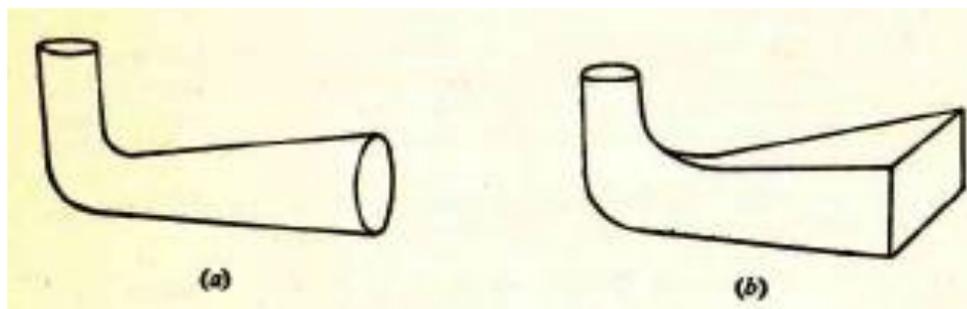


Conical draft tube umumnya digunakan pada turbin Francis. Untuk efisiensi yang baik → sudut central flaring dibuat sekitar 8° .

Conical draft tube yang mempunyai outlet jenis bell-mounted adalah yang paling sesuai untuk turbin reaksi aliran inward & outward yang mempunyai aliran helical yang disebabkan karena kecepatan whirl pada outlet dari runner. Efisiensi dari conical draft tube sebesar 90%.

4.26 Elbow Draft Tube

Pada elbow draft tube → bend atau lengkungan dari draft tube umumnya 90° dan luas penampang tube secara gradual naik dari outlet runner menuju channel (lihat gambar).



Elbow draft tube umumnya digunakan pada turbin Kaplan.

Elbow draft tube mempunyai bagian circular pada inlet & pada outlet (Gambar 1).

Namun pada gambar 2, elbow draft tube mempunyai bagian circular pada sisi inlet & bagian persegi pada sisi outlet. Efisiensi elbow draft tube umumnya antara 60% hingga 70%.

4.27 Efisiensi suatu Draft Tube

Efisiensi dari draft tube dapat ditentukan sbb :

$$\eta_t = \frac{\frac{(V_i)^2}{2 \cdot g} - \frac{(V_o)^2}{2 \cdot g}}{\frac{(V_i)^2}{2 \cdot g}} = \frac{(V_i)^2 - (V_o)^2}{(V_i)^2}$$

Dengan :

V_i = kecepatan air pada inlet draft tube

V_o = kecepatan air pada outlet draft tube

Example 22-24 : Suatu turbin Kaplan menghasilkan daya 2.000 HP pada head 6 m. Turbin di-set pada 2,5 m di atas tail water level. Suatu vacuum gage yang dipasang pada outlet dari turbin mencatat suatu head 3,1. Jika efisiensi turbin 85 %, berapa efisiensi dari draft tube yang mempunyai diameter inlet 3 m ?

Jawab :

Daya yang dihasilkan $P = 2.000 \text{ rpm}$

Head air $H = 6 \text{ m}$

Ketinggian turbin dari muka air

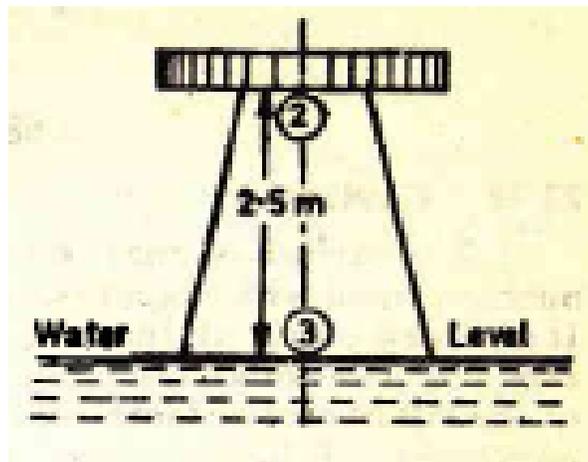
$$Z_2 = 2,5 \text{ m}$$

Vacuum gage pada outlet turbin $(P_2/w) = 3,1 \text{ m}$

$$(P_2/w) = - 3,1 \text{ m (vakum)}$$

Efisiensi keseluruhan $\eta_o = 85 \%$

Diameter inlet draft tube $d_2 = 3 \text{ m}$



Debit turbin $(Q) = \dots ?$

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$0,85 = \frac{2.000}{\left(\frac{1000 \times Q \times 6}{75} \right)}$$

$$Q = 29,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kecepatan air pada inlet dari draft tube (V_2) :

$$V_2 = \frac{Q}{a_2} = \frac{29,4}{\left(\frac{\pi}{4} \times 3^2\right)} = 4,16 \text{ m/s}$$

Penerapan persamaan Bernoulli pada titik 2 dan 3 sbb :

$$Z_2 + \frac{P_2}{w} + \frac{(V_2)^2}{2 \cdot g} = Z_3 + \frac{P_3}{w} + \frac{(V_3)^2}{2 \cdot g}$$

$$2,5 - 3,1 + \frac{(V_2)^2}{2 \cdot g} = 0 + 0 + \frac{(V_3)^2}{2 \cdot g}$$

$$\frac{(V_2)^2}{2 \cdot g} - \frac{(V_3)^2}{2 \cdot g} = 0,6$$

$$V_3 = 2,352 \text{ m/s}$$

Dengan hubungan sbb :

$$\eta_o = \frac{\frac{(V_2)^2}{2 \cdot g} - \frac{(V_3)^2}{2 \cdot g}}{\frac{(V_2)^2}{2 \cdot g}}$$

$$\eta_o = 68,03\%$$

4.28 Kavitas

Kavitas dapat didefinisikan sebagai gejala penguapan air akibat penurunan tekanan yang terjadi menyebabkan tekanannya di bawah tekanan jenuh pada suhu air tersebut. Uap air ini akan terbawa aliran ke zona bertekanan tinggi. Pada zona ini uap air akan berkondensasi sehingga uap air akan hilang. Ruang yang sebelumnya ditempati oleh gelembung uap air akan segera terisi oleh air sehingga akan terjadi suara berisik (noise) & getaran.

Tekanan yang menyebabkan gelembung uap air hilang umumnya pada orde 100 kali tekanan atmosfer.

Lubang-lubang (cavity) akan terjadi pada permukaan akibat pukulan air yang mengisi ruang gelembung uap air yang hilang secara terus-menerus. Hal ini akhirnya menyebabkan erosi pada permukaan yang disebut Pitting.

Kavitas memberikan pengaruh pada mesin-mesin hidrolik dalam 3 jalan, yaitu :

1. Hilangnya ruang gelembung yang diisi oleh air secara tidak teratur menyebabkan suara berisik (noise) dan getaran pada berbagai komponen.
2. Sebagai akibat dari Pitting → ada material yang hilang yang membuat permukaan menjadi kasar.
3. Sebagai akibat dari Cavity → akan ada penurunan debit turbin. Penurunan debit ini menyebabkan penurunan secara mendadak pada daya keluaran & efisiensi.

Profesor D. Thoma dari Jerman (setelah melakukan serangkaian penelitian) menyarankan suatu faktor kavitas (σ , sigma) untuk menentukan zona dimana suatu turbin reaksi dapat bekerja tanpa efek kavitas.

Nilai kritis dari faktor ini sbb :

$$\sigma_{\text{critic}} = \frac{H_b - H_s}{H} = \frac{(H_a - H_v) - H_s}{H}$$

Dengan :

H_b = head tekanan barometrik dari air [m]

H_s = head tekanan suction dari air [m]

H_a = head tekanan atmosfer dari air [m]

H_v = head tekanan uap dari air [m]

H = head kerja dari turbin [m]

Namun secara praktis → kavitasi (pada turbin reaksi) dapat dihindari dengan cara sbb :

1. Dengan memasang turbin di bawah level dari tail race
2. Dengan menyediakan suatu runner turbin yang bebas kavitasi
3. Dengan menggunakan runner dari bahan stainless steel
4. Dengan memoles sudu dari runner secara halus
5. Dengan menjalankan runner turbin pada kecepatan desainnya

Tutorial

1. Suatu turbin Francis mempunyai kecepatan tangensial runner 30 m/s, kecepatan whirl 24 m/s dan kecepatan aliran 3 m/s. Efisiensi hidrolis turbin sebesar 78 %. Jika debit turbin adalah dalam arah radial dan besarnya 1000 liter/detik, tentukan :

- a. Sudut sudu inlet
- b. Head pada turbin
- c. Daya yang dihasilkan turbin dalam HP

(Jawab : $153^{\circ} 26'$; 94,2 m; dan 980 HP)

2. Suatu turbin Francis yang mempunyai diameter luar 90 cm beroperasi pada 200 rpm. Head air pada turbin sebesar 9,5 m. Kecepatan aliran melalui runner tetap sebesar 3 m/s. Jika ujung sudu sisi inlet adalah radial dan lebar runner pada inlet sebesar 15 cm, tentukan :

- a. Kerja yang dilakukan turbin / kgf berat air
- b. Efisiensi hidrolis turbin
- c. Daya yang dihasilkan turbin dalam HP

(Jawab : 9,04 kgf.m; 95,19 %; dan 153,3 HP)

3. Suatu turbin Kaplan yang bekerja pada head air 5,5 m menghasilkan daya 10.000 HP. Rasio kecepatan sebesar 2,10 dan rasio aliran sebesar 0,71. Jika diameter boss sebesar $\frac{1}{3}$ dari diameter runner dan efisiensi keseluruhan sebesar 85 %, tentukan :

- a. Diameter runner
- b. Kecepatan putaran turbin

(Jawab : 5,58 m dan 75 rpm)

Highlights

1. Suatu turbin yang beroperasi dengan tekanan yang digunakan untuk mengalirkan air melewati sudu turbin dikenal sebagai turbin reaksi atau turbin tekanan.
2. Suatu turbin aliran inward radial yaitu suatu turbin dimana air masuk wheel dari sisi keliling sebelah luar dan selanjutnya air mengalir ke arah dalam (inward) menuju pusat dari wheel.
3. Suatu turbin aliran outward radial yaitu suatu turbin dimana air masuk wheel dari pusat wheel dan selanjutnya air mengalir menuju sisi keliling luar (outward) dari wheel.
4. Suatu turbin aliran aksial adalah suatu turbin dimana air mengalir sejajar dengan sumbu dari wheel.
5. Kerja yang dihasilkan turbin per kgf berat air adalah sbb :

$$\text{Kerja Yang Dilakukan} = \frac{V_w \cdot v}{g} - \frac{V_{w,1} \cdot v_1}{g}$$

Dengan :

- V_w = kecepatan whirl pada inlet
- v = kecepatan tangensial wheel pada inlet
- $V_{w,1}$ = kecepatan whirl pada outlet
- v_1 = kecepatan tangensial wheel pada outlet

6. Debit yang mengalir ke turbin sebesar :

$$Q = \pi \cdot D \cdot b \cdot V_f = \pi \cdot D_1 \cdot b_1 \cdot V_{f,1}$$

Dengan :

- D = diameter runner pada inlet
- b = lebar runner pada inlet
- V_f = kecepatan aliran pada inlet
- $D_1, b_1, V_{f,1}$ = nilai-nilai pada sisi outlet

7. Efisiensi hidrolis :

$$\eta_h = \frac{\frac{V_w \cdot v}{g} - \frac{V_{w,1} \cdot v_1}{g}}{H}$$

Jika debit dalam arah radial ($V_{w,1} = 0$), maka :

$$\eta_h = \frac{V_w \cdot v}{g \cdot H}$$

Dengan :

V_w = kecepatan whirl pada inlet

v = kecepatan tangensial runner pada inlet

H = head air

$V_{w,1}$ dan v_1 = nilai-nilai pada outlet

8. Efisiensi mekanik :

$$\eta_m = \frac{\text{Daya Aktual Yang Tersedia}}{\text{Energi Yang Diberikan ke Wheel}}$$

9. Efisiensi Keseluruhan :

$$\eta_o = \eta_h \cdot \eta_m = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

Dengan :

P = daya yang tersedia dari turbin

w = berat jenis air (= 1000 kgf/m³)

Q = debit turbin [m³/s]

H = head air

10. Daya yang dihasilkan oleh turbin reaksi :

$$P = \frac{\left(\text{Kerja Total Yang Dilakukan} \right) \text{ dalam satuan } \text{kgf.m} / \text{s}}{75}$$

11. Turbin Francis adalah suatu turbin rekasi aliran inward dengan debit berarah secara radial.
12. Turbin Kaplan adalah suatu turbin aliran aksial dimana aliran air sejajar dengan poros.

Do You Know ?

1. Apa yang dimaksud dengan turbin ? Terangkan dengan ringkas penggunaan turbin !
2. Tuliskan secara ringkas klasifikasi dari turbin hidrolis !
3. Terangkan perbedaan secara jelas antara turbin aliran radial & turbin aliran aksial !
4. Tuliskan perbedaan antara turbin aliran inward & turbin aliran outward !
5. Gambarkan diagram kecepatan pada sisi inlet & outlet untuk suatu sudu lengkung backward, sudu radial & sudu lengkung radial !
6. Tunjukkan dari prinsip dasar bahwa kerja yang dilakukan pada turbin reaksi adalah :

$$\text{Kerja Yang Dilakukan} = \frac{V_w \cdot v}{g} \pm \frac{V_{w,1} \cdot v_1}{g}$$

Dengan :

V_w dan $V_{w,1}$ = kecepatan air pada sisi inlet & outlet

v dan v_1 = kecepatan keliling pada sisi inlet & outlet

7. Turunkan suatu ekspresi / persamaan untuk efisiensi hidrolis dari turbin dalam suku kecepatan tangensial runner, kecepatan whirl pada inlet & outlet dan head air (H). Ambil semua kecepatan dalam arah runner positif.
8. Turunkan suatu persamaan untuk daya yang dihasilkan turbin reaksi dalam satuan HP !
9. Mengapa draft tube digunakan pada suatu turbin reaksi ? Deskripsikan dengan sketsa 2 jenis dari draft tube !
10. Terangkan secara ringkas alasan menempatkan suatu draft tube pada suatu turbin reaksi dan gambarkan sketsa 3 jenis yang umum !

5. Performansi Turbin

5.1 Pendahuluan

Pada 2 bab sebelumnya (turbin impuls & turbin reaksi), secara umum diasumsikan bahwa suatu turbin akan beroperasi pada head, kecepatan putar & daya keluaran yang konstan.

Namun secara aktual asumsi ini jarang berlangsung. Sehingga perlu meninjau ulang sifat dari variasi parameter ini. Meskipun banyak variasi, hal berikut penting diperhatikan :

1. Menjaga debit konstan → head air & daya keluaran dapat berubah; kecepatan putar yang berhubungan diatur sehingga tidak ada perubahan yang cukup besar pada efisiensi.
2. Menjaga head air dan kecepatan putar konstan → daya keluaran dapat berubah dengan mengatur debit aliran.
3. Pada turbin yang bekerja pada head rendah, head air dan kecepatan putar dapat berubah. Meskipun kecepatan putar diijinkan untuk berfluktuasi dalam batas yang diijinkan, head dapat berubah sampai 50 %.
4. Menjaga head air dan debit konstan → kecepatan putar dapat berubah dengan mengatur beban pada turbin. Hal ini biasanya dilakukan di laboratorium.

5.2 Karakteristik Turbin

Pada 2 bab sebelumnya (turbin impuls & turbin reaksi), secara umum diasumsikan bahwa suatu turbin akan beroperasi pada head, kecepatan putar & daya keluaran yang konstan.

Kadang-kadang kita harus membandingkan performansi turbin yang daya keluaran dan kecepatan putar yang beroperasi pada head yang berbeda.

Perbandingan ini akan tepat jika kita menghitung daya keluaran turbin dengan head air yang diset sama dengan 1 meter (head satuan).

Kita akan mempelajari 3 karakteristik suatu turbin pada suatu head satuan, yaitu :

1. Daya Satuan (Unit Power)
2. Kecepatan Putar Satuan (Unit Speed)
3. Debit Satuan (Unit Discharge)

5.3 Daya Satuan

Daya yang dihasilkan oleh suatu turbin yang bekerja pada head 1 meter dikenal sebagai Unit Power (Daya Satuan).

$$\text{Daya yang dihasilkan turbin (P)} : \quad P = \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

$$Q = \text{Luas Penampang Pipa} \times \text{Kecepatan Air dalam Pipa} = a \cdot V$$

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$P = \frac{w \cdot (a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}) \cdot H}{75} \propto H^{3/2}$$

$$P = P_u \cdot H^{3/2}$$

Atau :

$$P_u = \frac{P}{H^{3/2}}$$

Keterangan :

H = head air di mana turbin beroperasi

P = Daya yang dihasilkan turbin dalam satuan HP

Q = Debit yang mengalir melalui turbin

P_u = Daya yang dihasilkan turbin pada suatu head satuan

5.4 Kecepatan Satuan

Kecepatan putar turbin yang bekerja pada head 1 meter dikenal sebagai kecepatan putar satuan (unit speed).

Kecepatan tangensial runner (v) :

$$v \propto \text{Kecepatan Air} \\ \propto V$$

Ingat bahwa: $V = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$

Sehingga :

$$v \propto \sqrt{H}$$

Kecepatan tangensial runner (v) dapat pula disajikan sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

$$N = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D}$$

$$\propto v$$

$$\propto \sqrt{H} \quad (\text{karena: } v \propto H)$$

$$N = N_u \cdot \sqrt{H}$$

Sehingga : Kecepatan putar turbin pada suatu head satuan (Nu) :

$$N_u = \frac{N}{\sqrt{H}}$$

Kecepatan putar turbin yang bekerja pada head 1 meter dikenal sebagai kecepatan putar satuan (unit speed).

Keterangan :

H = Head air di mana turbin beroperasi

v = Kecepatan tangensial dari runner

N = Kecepatan putar turbin pada suatu head air

N_u = Kecepatan putar turbin pada suatu head satuan

5.5 Debit Satuan

Debit suatu turbin yang bekerja pada head 1 meter dikenal sebagai Debit Satuan (Unit Discharge).

$$Q = \text{Luas Penampang Pipa} \times \text{Kecepatan Air dalam Pipa} = a \cdot V$$

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$Q = a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$\propto \sqrt{H}$$

$$Q = Q_u \cdot \sqrt{H}$$

Sehingga : Debit satuan turbin (Q_u) :

$$Q_u = \frac{Q}{\sqrt{H}}$$

Keterangan :

H = Head air di mana turbin bekerja

Q = Debit yang melalui turbin pada suatu head air H

Q_u = Debit yang melalui turbin pada suatu head satuan

5.6 Signifikansi Daya Satuan, Kecepatan Satuan & Debit Satuan

Daya satuan, kecepatan putar satuan dan debit satuan → sangat penting pada bidang hidrolika. Parameter-parameter tersebut membantu dalam mendapatkan perilaku turbin saat bekerja pada head air yang berbeda, yaitu sbb :

Daya Satuan :

Ingat :

$$\begin{aligned}P &\propto H^{3/2} \\P_1 &\propto (H_1)^{3/2} \\ \frac{P}{P_1} &= \frac{(H)^{3/2}}{(H_1)^{3/2}}\end{aligned}$$

Sehingga didapat : $P_1 = P \cdot \left(\frac{H_1}{H}\right)^{3/2}$

Keterangan :

- H = Head air di mana turbin bekerja
- P = Daya yang dihasilkan turbin pada suatu head air H
- P₁ = Daya yang dihasilkan turbin pada suatu head air yang lain H₁

Kecepatan Putar Satuan :

Ingat :

$$\begin{aligned}N &\propto \sqrt{H} \\N_1 &\propto \sqrt{H_1} \\ \frac{N}{N_1} &= \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H_1}}\end{aligned}$$

Sehingga didapat :

$$N_1 = N \cdot \left(\frac{H_1}{H}\right)^{1/2}$$

Keterangan :

H = Head air di mana turbin bekerja

N = Kecepatan putar turbin pada suatu head air H

N₁ = Kecepatan putar turbin pada suatu head air yang lain H₁

Debit Satuan :

Ingat :

$$Q \propto \sqrt{H}$$

$$Q_1 \propto \sqrt{H_1}$$

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{H_1}}$$

Sehingga didapat :

$$Q_1 = Q \cdot \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2}$$

Keterangan :

H = Head air di mana turbin bekerja

Q = Debit turbin pada suatu head air H

Q₁ = Debit turbin pada suatu head air yang lain H₁

Example 23-1 : Suatu turbin impuls pada kecepatan putar terbaiknya menghasilkan daya 125 HP pada head 64 m. Berapa % kenaikan kecepatan putar pada head 81 m ?

Jawab :

Daya $P = 125 \text{ HP}$

Head awal $H = 64 \text{ m}$

Head baru $H_1 = 81 \text{ m}$

Keterangan :

N = kecepatan putar turbin pada head $H = 64 \text{ m}$

N_1 = kecepatan putar turbin pada head $H_1 = 81 \text{ m}$

$$N_1 = N \cdot \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2} = N \cdot \left(\frac{81}{64} \right)^{1/2} = \frac{9 \cdot N}{8}$$

$$\text{Kenaikan Kecepatan Putar} = \frac{N_1 - N}{N} = \frac{\left(\frac{9}{8} \cdot N \right) - N}{N} = 0,125 = 12,5 \%$$

Example 23-2 : Suatu turbin Pelton menghasilkan daya 7.500 HP pada head 240 m dengan efisiensi keseluruhan 83 % pada kecepatan putar 200 rpm. Tentukan debit satuan, daya satuan, dan kecepatan putar satuan.

Asumsikan koefisien keliling 0,46. Jika head pada turbin yang sama turun selama musim panas menjadi 150 m, tentukan : debit, daya & kecepatan putar pada head ini.

Jawab :

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Daya | $P = 7.500 \text{ HP}$ |
| Head awal | $H = 240 \text{ m}$ |
| Efisiensi keseluruhan | $\eta_o = 83 \%$ |
| Koefisien keliling | $= 0,46$ |
| Head baru | $H_1 = 150 \text{ m}$ |

Debit (Q) didapat dari persamaan efisiensi keseluruhan sbb :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75}\right)}$$
$$0,83 = \frac{7.500}{\left(\frac{1000 \times Q \times 240}{75}\right)}$$
$$Q = 2,824 \text{ m}^3/\text{s}$$

Debit satuan (Q_u) = ... ?

$$Q_u = \frac{Q}{\sqrt{H}} = \frac{2,824}{\sqrt{240}} = 0,1823 \text{ m}^3/\text{s}$$

Daya satuan (P_u) = ... ?

$$P_u = \frac{P}{H^{3/2}} = \frac{7.500}{240^{3/2}} = 2,017 \text{ HP}$$

Kecepatan Putar Satuan (N_u) = ... ?

$$N_u = \frac{N}{\sqrt{H}} = \frac{200}{\sqrt{240}} = 12,9 \text{ rpm}$$

Debit pada musim panas (Q_1) = ... ?

$$Q_1 = Q \cdot \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2} = 2,824 \cdot \left(\frac{150}{240} \right)^{1/2} = 2,233 \text{ m}^3/\text{s}$$

Daya yang dihasilkan pada musim panas (P_1) = ... ?

$$P_1 = P \cdot \left(\frac{H_1}{H} \right)^{3/2} = 7.500 \times \left(\frac{150}{240} \right)^{3/2} = 3.705,8 \text{ HP}$$

Kecepatan putar pada musim panas (N_1) = ... ?

$$N_1 = N \cdot \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2} = 200 \times \left(\frac{150}{240} \right)^{1/2} = 158,1 \text{ rpm}$$

Tutorial

1. Suatu turbin yang beroperasi pada head 23,4 m menghasilkan 28.000 HP pada kecepatan putar 250 rpm. Tentukan daya satuan dan kecepatan putar satuan. (25,2 HP dan 51,6 rpm)
2. Suatu turbin menghasilkan daya 13.000 HP saat beroperasi pada head 165 m. Kecepatan putar turbin sebesar 320 rpm. Tentukan daya satuan dan kecepatan putar satuannya. (Jawab : 6,2 HP dan 25 rpm)
3. Suatu turbin yang berputar pada 150 rpm dialiri air dengan debit 3,5 m³/s dari suatu sumber air dengan head 50 m sehingga menghasilkan daya sebesar 1.200 HP. Tentukan kecepatan putar normal dan daya yang dihasilkan pada head 100 m. (Jawab : 212 rpm dan 33,95 HP)
4. Suatu turbin menghasilkan daya 500 HP pada head 100 m dengan kecepatan putar 200 rpm. Berapa kecepatan putar dan daya keluaran normal pada head 81 m ? (Jawab : 180 rpm dan 364,5 HP)

5.7 Kecepatan Spesifik suatu Turbin

Sesudah mempelajari perilaku suatu turbin pada suatu kondisi satuan, berikutnya adalah mengetahui karakteristik suatu turbin imajiner yang identik dengan turbin aktual, namun direduksi ukurannya. Turbin imajiner ini disebut Turbin Spesifik dan kecepatan putarnya disebut Kecepatan Putar Spesifik (specific speed).

Sehingga kecepatan putar spesifik suatu turbin dapat didefinisikan sebagai kecepatan putar dari suatu turbin imajiner yang identik dengan turbin yang diberikan yang akan menghasilkan daya 1 HP pada suatu head satuan (1 meter).

Kecepatan tangensial dari runner (v) :

$$v \propto V$$

$$\text{Ingat bahwa: } V = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Sehingga :

$$v \propto \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$v \propto \sqrt{H}$$

Kecepatan tangensial dari runner (v) dapat pula ditulis sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

$$D \cdot N \propto v$$

$$\propto \sqrt{H} \quad (\text{karena: } v \propto H)$$

$$D \propto \frac{\sqrt{H}}{N} \quad \text{pers. (i)}$$

Keterangan :

Q = Debit melalui turbin

b = Lebar runner turbin

V_f = Kecepatan aliran

D = Diameter runner turbin

Debit aliran (Q) :

$$Q = \pi \cdot D \cdot b \cdot V_f$$

Ingat :

$$b \propto D$$

$$V_f \propto \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$
$$\propto \sqrt{H}$$

Sehingga :

$$Q \propto D^2 \cdot \sqrt{H}$$

Substitusikan nilai D^2 dari persamaan (i) menjadi :

$$Q \propto \left(\frac{\sqrt{H}}{N} \right)^2 \cdot \sqrt{H}$$

Sehingga :

$$Q \propto \frac{H^{3/2}}{N^2} \quad \text{pers. (ii)}$$

Daya yang dihasilkan turbin (P) :

$$P = \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$

$$P = \frac{w \cdot Q \cdot H}{75}$$
$$\propto Q \cdot H$$

Substitusikan nilai Q dari persamaan (ii) menjadi :

$$P \propto \left(\frac{H^{3/2}}{N^2} \right) \cdot H$$

$$\propto \frac{H^{5/2}}{N^2}$$

atau :

$$N^2 \propto \frac{H^{5/2}}{P}$$

$$N \propto \frac{H^{5/4}}{\sqrt{P}}$$

$$= N_s \cdot \frac{H^{5/4}}{\sqrt{P}}$$

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

Keterangan :

N_s = Kecepatan putar spesifik turbin

D = diameter dari runner turbin

N = Kecepatan putar runner dalam rpm

v = Kecepatan tangensial dari runner

V = Kecepatan mutlak dari air

Pada hubungan kecepatan spesifik di atas, **satuan untuk P [HP], H [m], dan N [rpm]**

Dalam satuan SI \rightarrow Daya dinyatakan dalam kW. Namun satuan H dan N tidak berubah.

Sehingga jelas bahwa nilai kecepatan spesifik dalam SI akan berbeda dengan satuan dalam MKS.

Hubungan antara 2 kecepatan spesifik sbb :

$$N_s (\text{satuan SI}) = 0,86 \cdot N_s (\text{satuan MKS})$$

Example 23-3 : Suatu hydraulic site mempunyai head 9 m dan debit rata-rata 11.200 liter/detik yang disediakan untuk suatu generator dengan kecepatan putar 200 rpm. Berapa kecepatan spesifiknya ?

Asumsikan efisiensi sebesar 92 %

Jawab :

Head $H = 9 \text{ m}$

Debit $Q = 11.200 \text{ liter/detik} = 11,2 \text{ m}^3/\text{s}$

Kecepatan putar $N = 200 \text{ rpm}$

Efisiensi $\eta = 92 \%$

Keterangan :

P = daya yang dihasilkan turbin

Ns = kecepatan spesifik turbin

Daya yang dihasilkan (P) ditentukan dari rumus efisiensi sbb :

$$\eta = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$0,92 = \frac{P}{\left(\frac{1000 \times 11,2 \times 9}{75} \right)}$$

$$P = 1.236,48 \text{ HP}$$

Kecepatan putar spesifik (Ns) = ... ?

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{200 \times \sqrt{1.236,48}}{9^{5/4}} = 451,15 \text{ rpm}$$

Example 23-4 : Suatu turbin menghasilkan daya 10.000 kW pada head 25 m dengan kecepatan putar 135 rpm. Berapa kecepatan spesifiknya ? Berapa kecepatan putar dan daya normal yang dihasilkan pada head 20 m ?

Jawab :

Daya $P = 10.000 \text{ kW}$

Head $H = 25 \text{ m}$

Kecepatan putar $N = 135 \text{ rpm}$

Head air baru $H_1 = 20 \text{ m}$

Kecepatan Spesifik (Ns) = ... ?

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{135 \times \sqrt{10.000}}{25^{5/4}} = 241,5 \text{ rpm}$$

Kecepatan Putar Normal (pada head air baru, N1) = ... ?

$$N_1 = N \cdot \left(\frac{H_1}{H}\right)^{1/2} = 135 \times \left(\frac{20}{25}\right)^{1/2} = 120,7 \text{ rpm}$$

Daya Normal (pada head air baru, P1) = ... ?

$$P_1 = P \cdot \left(\frac{H_1}{H}\right)^{3/2} = 10.000 \times \left(\frac{20}{25}\right)^{3/2} = 7.155,4 \text{ kW}$$

Example 23-5 : Satu turbin Kaplan yang dipasang pada pembangkit listrik Ganguwal (proyek bendungan Bhakra) menghasilkan daya 34.000 HP jika beroperasi pada head 30 m dan kecepatan putar 166,7 rpm. Tentukan diameter runner.

Diasumsikan efisiensi keseluruhan turbin sebesar 0,91; rasio aliran 0,65, dan diameter hub runner sebesar 0,3 kali diameter luar runner.

Tentukan pula kecepatan spesifik turbin tersebut !

Jawab :

| | |
|-----------------------|-------------------------|
| Daya | $P = 34.000 \text{ HP}$ |
| Head air | $H = 30 \text{ m}$ |
| Kecepatan putar | $N = 166,7 \text{ rpm}$ |
| Efisiensi keseluruhan | $\eta_o = 0,91$ |
| Diameter hub | $D_b = 0,3 \cdot D$ |

$$\text{Rasio Kecepatan} = \frac{V_f}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} = 0,65$$

Kecepatan aliran (Vf) :

$$V_f = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 30} = 24,26 \text{ m/s}$$

Diameter Runner (D) = ... ?

Debit (Q) dapat ditentukan sbb :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$0,91 = \frac{34.000}{\left(\frac{1000 \cdot Q \cdot 30}{75} \right)}$$

$$Q = 93,41 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sehingga :

Diameter Runner (D) :

$$Q = V_f \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - (D_b)^2) \right]$$
$$93,41 = 24,26 \cdot \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - (0,3 \cdot D)^2) \right]$$
$$D = 2,32 \text{ m}$$

Kecepatan Spesifik turbin (Ns) = ... ?

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{166,7 \times \sqrt{34.000}}{30^{5/4}} = 437,8 \text{ rpm}$$

Example 23-6 : Buktikan bahwa untuk suatu turbin Pelton single jet, kecepatan spesifik diberikan oleh hubungan sbb :

$$N_s = 250 \cdot \frac{d}{D} \cdot \sqrt{\eta}$$

Dengan :

d = Diameter jet [m]

D = Diameter runner [m]

h = Efisiensi keseluruhan turbin

Koefisien kecepatan untuk nosel sebesar 0,98 dan kecepatan bucket sebesar 0,46 kali kecepatan jet air.

Jawab :

Koefisien kecepatan $C_v = 0,98$

Kecepatan bucket $v = 0,46 \cdot V$

d = Diameter jet [m]

D = Diameter runner [m]

η = Efisiensi keseluruhan turbin

N = Kecepatan putar runner [rpm]

N_s = Kecepatan putar spesifik runner

P = Daya yang dihasilkan turbin

Q = Debit turbin

H = Head air di mana turbin beroperasi

Kecepatan Jet air (V) :

$$v = C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

Kecepatan Bucket (v) :

$$v = 0,46 \cdot V = 0,46 \times 0,98 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$v = 0,45 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad \text{pers.(i)}$$

Kecepatan putar (N) juga dapat ditentukan dari Kecepatan Bucket (v) sbb :

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

$$0,45 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{60}$$

atau :

$$N = \frac{60 \times 0,45 \times \sqrt{2 \cdot g \cdot H}}{\pi \cdot D} = \frac{38 \cdot \sqrt{H}}{D} \quad \text{pers.(ii)}$$

Debit Aliran (Q) :

$$\begin{aligned} Q &= C_v \cdot (\text{Luas Penampang Jet Air}) \times (\text{Kecepatan Jet Air}) \\ &= C_v \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right) \times \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \end{aligned}$$

Daya Turbin (P) dapat ditentukan dari rumus efisiensi keseluruhan sbb :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)} \\ P &= \eta \cdot \left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right) \end{aligned}$$

Substitusikan nilai Q ke persamaan di atas sehingga menjadi :

$$\begin{aligned} P &= \frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \cdot \eta = \frac{1000 \times \left[0,98 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right) \times \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \right] \times H}{75} \cdot \eta \\ P &= 45,2 \cdot H^{3/2} \cdot d^2 \cdot \eta \quad \text{pers. (iii)} \end{aligned}$$

Kecepatan putar spesifik (Ns) ditentukan dari hubungan sbb :

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{N \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}} \\ &= \frac{\left(\frac{38 \cdot \sqrt{H}}{D} \right) \cdot \sqrt{45,2 \cdot H^{3/2} \cdot d^2 \cdot \eta}}{H^{5/4}} \\ &= 250 \cdot \frac{d}{D} \cdot \sqrt{\eta} \end{aligned}$$

Example 23-7 : Pada suatu PLTA, air tersedia pada suatu head 1,7 m dengan laju aliran 260 m³/s. Hitung jumlah turbin Kaplan jika beroperasi pada 50 rpm dengan efisiensi keseluruhan 82 %. Kecepatan spesifik turbin tidak lebih dari 800 rpm. Hitung juga daya yang dihasilkan tiap turbin.

Jawab :

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Head | H = 1,7 m |
| Debit total | = 260 m ³ /s |
| Kecepatan putar | N = 50 rpm |
| Efisiensi keseluruhan | $\eta_o = 82 \%$ |
| Kecepatan spesifik | N _s = 800 rpm |

Daya yang dihasilkan tiap turbin (P) = ... ?

Debit (Q) didapat dari hubungan sbb :

$$\eta_o = \frac{P}{\left(\frac{w \cdot Q \cdot H}{75} \right)}$$

$$0,82 = \frac{975}{\left(\frac{1000 \times Q \times 1,7}{75} \right)}$$

$$Q = 52,46 \text{ m}^3/\text{s}$$

Jumlah turbin Kaplan = ... ?

$$\text{Jumlah Turbin} = \frac{Q_{\text{total}}}{Q_{\text{tiap turbin}}} = \frac{260}{52,46} \approx 5 \text{ buah}$$

5.8 Signifikansi Kecepatan Spesifik

Arti penting dari kecepatan (putar) spesifik suatu turbin adalah bahwa kecepatan (putar) spesifik tak tergantung dari dimensi atau ukuran baik dari turbin aktual maupun turbin spesifik.

Jelas bahwa semua turbin (yang secara geometri serupa yang beroperasi pada head yang sama dan mempunyai nilai rasio kecepatan serta rasio aliran yang sama) akan mempunyai kecepatan (putar) spesifik yang sama.

Kecepatan (putar) spesifik membantu dalam memperkirakan performansi suatu turbin.

5.9 Pemilihan Turbin

Seorang insinyur sering memilih tipe turbin untuk digunakan pada proyek yang ditanganinya.

Pemilihan turbin secara umum berdasarkan pada 2 faktor sbb :

1. Kecepatan Spesifik
2. Head Air

Pemilihan berdasarkan kecepatan spesifik merupakan metode yang paling logis dan memberikan informasi yang tepat.

Sedangkan pemilihan berdasarkan head air didasarkan pada pengalaman dan faktor observasi saja.

5.10 Pemilihan berdasarkan Kecepatan Spesifik

Setelah kecepatan spesifik turbin ditentukan → jenis turbin dapat dipilih.

Berikut adalah tabel yang menunjukkan tipe turbin yang dipilih untuk suatu kecepatan spesifik.

TABLE 23-1

| <i>S. No.</i> | <i>Specific speed</i> | <i>Type of turbine</i> |
|---------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 1. | 10 to 35 | Pelton wheel with one nozzle. |
| 2. | 35 to 60 | Pelton wheel with 2 or more nozzles. |
| 3. | 60 to 300 | Francis' turbine. |
| 4. | 300 to 1,000 | Kaplan turbine. |

Tabel dalam satuan MKS → P [HP], H [m], dan N [rpm]

Catatan :

Jika soal diberikan dalam satuan SI → maka dianjurkan untuk mengkonversi kecepatan spesifik dalam satuan SI dengan satuan kecepatan spesifik dalam satuan MKS yang berkaitan. Setelah itu tabel di atas dapat digunakan.

5.11 Pemilihan berdasarkan Head dari Air

Tabel berikut menunjukkan tipe turbin yang digunakan untuk suatu head air.

| <i>S. No.</i> | <i>Head of water in metres</i> | <i>Type of turbine</i> |
|---------------|--------------------------------|--|
| 1. | 0 to 25 | Kaplan or Francis' (preferably Kaplan) |
| 2. | 25 to 50 | Kaplan or Francis' (preferably Francis') |
| 3. | 50 to 150 | Francis' |
| 4. | 150 to 250 | Francis' or Pelton (preferably Francis) |
| 5. | 250 to 300 | Francis' or Pelton (preferably Pelton) |
| 6. | above 300 | Pelton. |

Example 23-8 : Tentukan tipe turbin yang seharusnya digunakan untuk head air 150 m yang dapat menghasilkan 2.000 HP dan beroperasi pada 300 rpm.

Jawab :

Head $H = 150$ m
Daya yang dihasilkan $P = 2.000$ HP
Kecepatan putar $N = 300$ rpm

Kecepatan putar spesifik (N_s) :

$$\begin{aligned} N_s &= \frac{N \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}} \\ &= \frac{300 \cdot \sqrt{2.000}}{150^{5/4}} = 25,6 \text{ rpm} \end{aligned}$$

Karena kecepatan putar spesifik turbin sebesar 25,6 rpm → maka seharusnya digunakan *turbin Pelton dengan 1 nosel*.

Example 23-8 : Tentukan kecepatan putar spesifik dan tipe turbin air yang dapat menghasilkan daya 7.000 kW pada head air 20 m yang beroperasi pada kecepatan putar 100 rpm. Hitung juga kecepatan normal dan daya yang dihasilkan jika head air sebesar 25 m.

Jawab :

| | |
|----------------------|------------------------|
| Daya yang dihasilkan | $P = 7.000 \text{ kW}$ |
| Head awal | $H = 20 \text{ m}$ |
| Kecepatan putar | $N = 100 \text{ rpm}$ |
| Head baru | $H_1 = 25 \text{ m}$ |

Kecepatan putar spesifik (Ns) :

$$N_s = \frac{N \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

$$= \frac{100 \cdot \sqrt{7.000}}{20^{5/4}} = 197,8 \text{ rpm}$$

Kecepatan putar spesifik turbin

$$= 197,8 \text{ rpm} \quad (\text{dalam satuan SI})$$

$$= 0,86 \times 197,8 = \mathbf{170,1 \text{ rpm}} \quad (\text{dalam satuan MKS})$$

Sehingga yang seharusnya digunakan adalah *turbin Francis*.

Kecepatan putar normal (pada head air 25 m, N₁) :

$$N_1 = N \cdot \left(\frac{H_1}{H}\right)^{1/2} = 100 \cdot \left(\frac{25}{20}\right)^{1/2} = 111,8 \text{ rpm}$$

Daya keluaran normal (pada head air 25 m, P₁) :

$$P_1 = P \cdot \left(\frac{H_1}{H} \right)^{1/2} = 7.000 \cdot \left(\frac{25}{20} \right)^{3/2} = 9.782,8 \text{ kW}$$

Example 23-10 : Suatu turbin Pelton menghasilkan 2.500 HP yang beroperasi pada head 70 m. Tentukan kecepatan putar turbin maksimum dan minimum yang beroperasi dengan sebuah jet air.

Jawab :

Daya yang dihasilkan $P = 2.500 \text{ HP}$

Head air $H = 70 \text{ m}$

Kecepatan putar maksimum turbin (N_{\max}) = ... ?

Dari tabel didapatkan bahwa kecepatan putar spesifik maksimum suatu turbin Pelton dengan 1 buah nosel sebesar $\rightarrow N_{s,\max} = 35$

$$N_{s,\max} = \frac{N_{\max} \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

$$35 = \frac{N_{\max} \cdot \sqrt{2.500}}{70^{5/4}}$$

$$N_{\max} = 141,73 \text{ rpm}$$

Kecepatan putar minimum turbin (N_{\min}) = ... ?

Dari tabel didapatkan bahwa kecepatan putar spesifik minimum suatu turbin Pelton dengan 1 buah nosel sebesar $\rightarrow N_{s,\min} = 10$

$$N_{s,\min} = \frac{N_{\min} \cdot \sqrt{P}}{H^{5/4}}$$
$$10 = \frac{N_{\min} \cdot \sqrt{2.500}}{70^{5/4}}$$
$$N_{\min} = 40,5 \text{ rpm}$$

5.12 Kurva Karakteristik dari Turbin

Turbin selalu didesain & dibuat untuk beroperasi pada set data yang diberikan (atau daerah kondisi yang tertentu) seperti : debit, head air, dan daya yang dihasilkan, efisiensi, dsb. (pada kecepatan putar atau kecepatan putar satuan).

Namun suatu turbin kadang dioperasikan pada kondisi di luar data perancangannya. Sehingga perlu mengetahui perilaku turbin pada kondisi yang berbeda atau bervariasi.

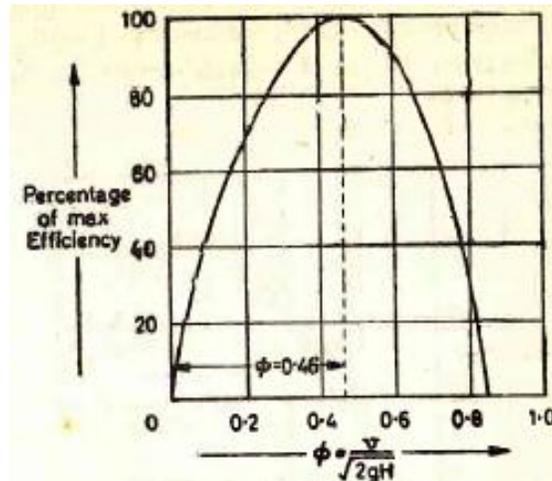
Hal ini disajikan secara grafik dalam \rightarrow **Kurva-Kurva Karakteristik**.

Meskipun ada banyak tipe kurva karakteristik, berikut disajikan kurva karakteristik untuk:

- a. **Turbin Pelton**
- b. **Turbin Francis** (atau turbin reaksi yang lain).

5.13 Kurva Karakteristik Roda Pelton (Pelton Wheel)

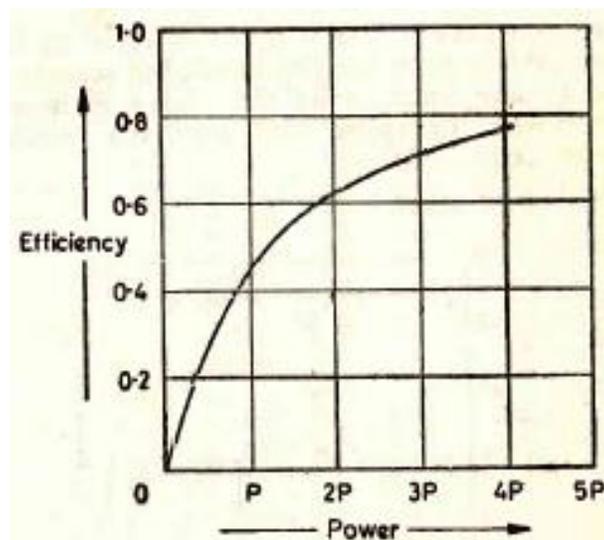
a. Grafik Rasio Kecepatan (f) – Efisiensi Maksimum



Kurva menunjukkan performansi suatu turbin Pelton pada suatu head & debit.

Bentuk kurva adalah **parabolik** yang menunjukkan bahwa *efisiensi naik dari nol (0) dan turun setelah rasio $f = 0,46$.*

b. Grafik Daya – Efisiensi



Kurva menunjukkan performansi suatu turbin Pelton pada suatu head & debit yang konstan. Bentuk kurva adalah **parabolik** yang menunjukkan bahwa *efisiensi naik seiring dengan kenaikan daya*.

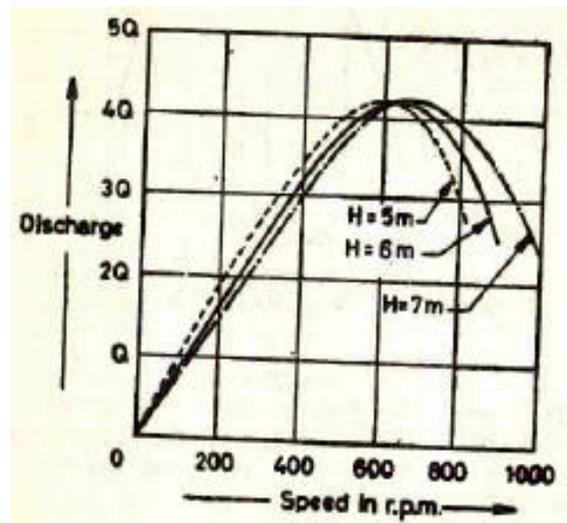
5.14 Kurva Karakteristik Turbin Francis

Seperti pada kurva karakteristik dari turbin Pelton, kurva karakteristik untuk turbin Francis (atau turbin reaksi yang lain) dapat dikelompokkan pada 2 head sbb :

1. Untuk **Kecepatan Putar dengan Head Yang Bervariasi**
2. Untuk **Kecepatan Putar pada suatu Head Satuan**

5.15 Kurva Karakteristik Turbin Francis untuk Kecepatan dengan Variasi Head

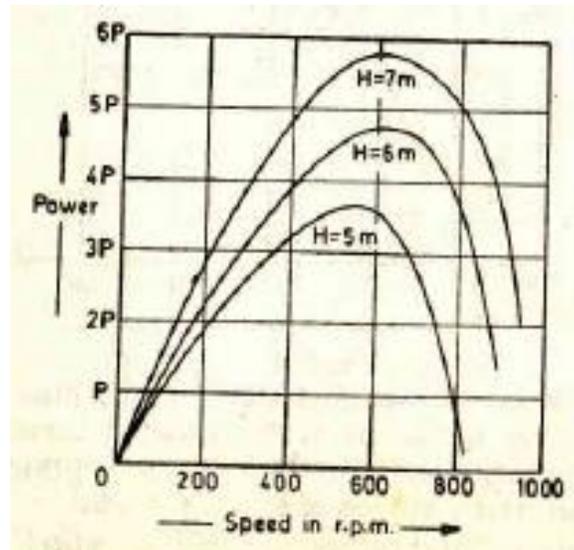
a. Grafik Kecepatan Putar – Debit



Kurva menunjukkan performansi suatu turbin Francis (atau turbin reaksi lain) *pada head yang bervariasi, namun debit konstan*.

Bentuk kurva adalah **parabolik** yang menunjukkan bahwa *untuk suatu head tertentu, debit naik seiring dengan kenaikan kecepatan putar dari rpm nol & debit turun setelah mencapai kecepatan putar tertentu.*

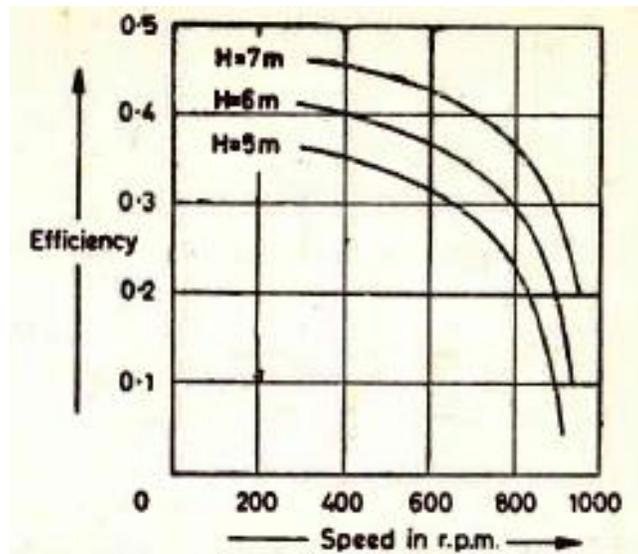
b. Grafik Kecepatan Putar – Daya



Kurva menunjukkan performansi suatu turbin Francis (atau turbin reaksi lain) *pada head yang bervariasi, namun debit konstan.*

Bentuk kurva adalah **parabolik** yang menunjukkan bahwa *untuk suatu head tertentu, daya naik seiring dengan kenaikan kecepatan putar dari rpm nol & daya turun setelah mencapai kecepatan putar tertentu.*

c. Grafik Kecepatan Putar – Efisiensi

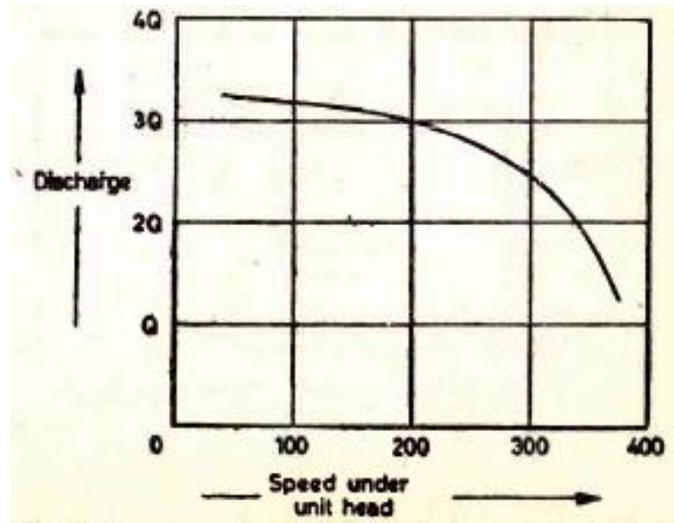


Kurva menunjukkan performansi suatu turbin Francis (atau turbin reaksi lain) *pada head yang bervariasi, namun debit konstan.*

Bentuk kurva adalah **parabolik** yang menunjukkan bahwa *untuk suatu head tertentu, efisiensi turun seiring dengan kenaikan kecepatan putar.*

5.16 Kurva Karakteristik Turbin Francis untuk Kecepatan pada Head Satuan

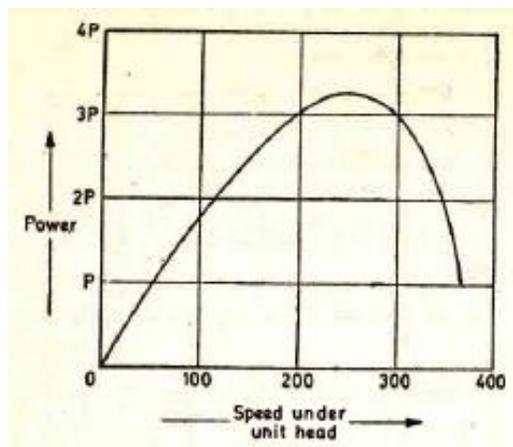
a. Grafik Kecepatan Putar (pada Head Satuan) – Debit



Kurva menunjukkan performansi suatu turbin Francis (atau turbin reaksi lain).

Bentuk kurva adalah **parabolik** yang menunjukkan bahwa *debit turun seiring dengan kenaikan kecepatan putar pada head satuan.*

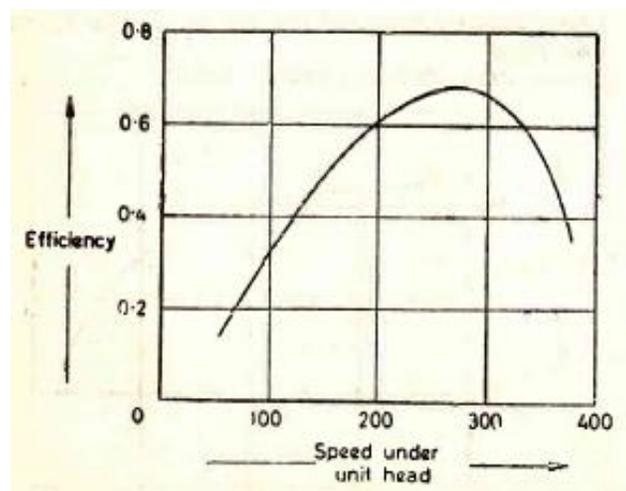
b. Grafik Kecepatan Putar (pada Head Satuan) – Daya



Kurva menunjukkan performansi suatu turbin Francis (atau turbin reaksi lain).

Bentuk kurva adalah **parabolik** yang menunjukkan bahwa *daya naik seiring dengan kenaikan kecepatan putar pada head satuan dan daya akan turun pada suatu kecepatan putar tertentu.*

c. Grafik Kecepatan Putar (pada Head Satuan) – Efisiensi



Kurva menunjukkan performansi suatu turbin Francis (atau turbin rreaksi lain).

Bentuk kurva adalah **parabolik** yang menunjukkan bahwa *efisiensi naik seiring dengan kenaikan kecepatan putar pada head satuan dan efisiensi akan turun pada suatu kecepatan putar tertentu.*

Tutorial

1. Tentukan kecepatan spesifik suatu turbin yang menghasilkan daya 10.000 HP pada head 27 m dan kecepatan putar 120 rpm. (Jawab : 195 rpm)
2. Suatu turbin menghasilkan daya 50.000 HP pada head 110 m dan kecepatan putar 200 rpm. Tentukan kecepatan putar spesifik turbin tersebut. (Jawab : 39,7 rpm)
3. Tentukan tipe turbin yang harus digunakan untuk menghasilkan daya 1.700 HP pada head 150 m dengan kecepatan putar 375 rpm dan dengan debit air 200 liter/detik. (Jawab : $N_s = 29,4 \rightarrow$ turbin Pelton dengan 1 nosel)

Do You Know ?

1. Definisikan istilah daya satuan, kecepatan putar satuan, dan debit satuan dengan referensi suatu turbin hidrolis !
2. Turunkan persamaan hubungan untuk daya satuan, kecepatan putar satuan, dan debit satuan untuk suatu turbin !
3. Apakah anda mengerti istilah turbin spesifik dan kecepatan putar spesifik?
4. Apakah anda mengerti istilah kecepatan putar spesifik dari suatu turbin ?
5. Turunkan persamaan hubungan untuk kecepatan putar spesifik suatu turbin dalam suku daya (P), head (H), dan kecepatan putar rpm (N) !
6. Terangkan arti penting dari kecepatan putar spesifik suatu turbin air !
7. Berikan range nilai kecepatan putar spesifik dari turbin Kaplan, turbin Francis, dan turbin Pelton !
8. Faktor apa yang menentukan dalam pemilihan suatu tipe turbin yang digunakan pada suatu PLTA, apakah turbin kaplan, turbin Francis, atukah turbin Pelton !
9. Gambarkan kurva karakteristik dari suatu turbin sbb :
 - a. Daya terhadap Efisiensi pada kecepatan putar konstan
 - b. Debit, Daya, dan Efisiensi terhadap Kecepatan putar
10. Gambarkan kurva karakteristik dari turbin air yang menunjukkan laju aliran dan daya terhadap kecepatan putar satuan !

DAFTAR PUSTAKA

1. <http://repository.umy.ac.id/handle/123456789/4266>

