

TURBIN UAP

Turbin uap adalah penggerak mula dimana gerak putar diperoleh dengan perubahan gradual dari momentum uap. Pada turbin uap, gaya dibangkitkan pada sudu (blade) karena kecepatan uap. Ini terjadi karena sudu yang berbentuk lengkung akan merubah arah uap sehingga menerima gaya atau impuls. Kerja uap dalam hal ini disebut *dinamik*. Karena itu tekanan dinamik uap akan memutar sudu secara langsung.

Secara umum, sebuah turbin uap secara prinsip terdiri dari dua komponen berikut:

1. Nosel, dimana energi panas dari uap tekanan tinggi dirobah menjadi energi kinetik, sehingga uap keluar dari nosel dengan kecepatan sangat tinggi.
2. Sudu, yang merubah arah dari uap yang disemprotkan nosel, sehingga akan bekerja gaya pada sudu karena perubahan momentum dan memutar turbin.

Klasifikasi Turbin Uap

Turbin uap secara mudah bisa diklasifikasikan kedalam jenis-jenis berikut:

1. Berdasarkan aksi uap:
 - (i) Turbin impuls
 - (ii) Turbin reaksi
2. Berdasarkan arah aliran uap:
 - (i) Turbin aliran aksial
 - (ii) Turbin aliran radial
3. Berdasarkan kondisi exhaust uap:
 - (i) Turbin kondensasi
 - (ii) Turbin non-kondensasi
4. Berdasarkan tekanan uap:
 - (i) Turbin tekanan tinggi
 - (ii) Turbin tekanan sedang

- (iii) Turbin tekanan rendah
- 5. Berdasarkan jumlah tingkat:
 - (i) Turbin tingkat satu (single stage turbine)
 - (ii) Turbin banyak tingkat

A. Turbin Impuls

Turbin impuls sesuai namanya adalah turbin yang berjalan dengan impuls dari semburan/jet uap. Pada turbin ini, uap pertama-tama mengalir melalui nosel, kemudian semburan uap menumbuk sudu turbin yang terpasang pada roda. Semburan uap setelah menumbuk sudu, mengalir melalui permukaan cekung sudu dan pada akhirnya meninggalkan turbin.

Turbin Impuls De-Level

Turbin De-Level adalah jenis paling sederhana dari turbin uap impuls dan banyak digunakan. Turbin mempunyai komponen-komponen utama berikut:

1. Nosel.

Adalah mekanisme pengarah berbentuk lingkaran, yang mengarahkan uap mengalir sesuai kecepatan dan arah yang sudah didesain. Nosel juga mengatur aliran uap. Posisi nosel dibuat sedekat mungkin dengan sudu, untuk meminimalkan kerugian

2. Sudu dan *runner*.

Runner turbin De-Level pada prinsipnya terdiri dari piringan bulat yang terpasang pada poros horisontal. Pada sekeliling runner dipasang sejumlah sudu yang sama. Semburan uap menumbuk mangkok, yang kemudian bergerak searah semburan. Gerakan sudu ini membuat runner berputar.

Permukaan sudu dibuat sangat halus untuk meminimalkan kerugian gesek. Sudu biasanya terbuat dari paduan baja. Pada sebagian besar konstruksi, sudu dibaut ke runner, tetapi kadang-kadang sudu dan piringan dicor sebagai satu unit tunggal.



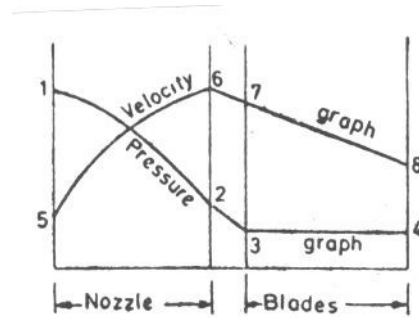
Gambar 1. Runner dan mangkok turbin impuls.

3. Rumah turbin / casing.

Merupakan rumah logam kedap udara, yang berisikan runner turbin dan sudu. Rumah turbin mengatur gerakan uap dari sudu hingga kondenser dan tidak memungkinkan untuk mengalir ke udara. Lebih jauh, rumah turbin berfungsi sebagai pengaman runner dari kemungkinan berbagai kecelakaan.

Tekanan Dan Kecepatan Uap Pada Turbin Impuls

Tekanan semburan uap berkurang di dalam nosel dan konstan ketika melalui sudu yang bergerak. Kecepatan uap naik di dalam nosel dan berkurang ketika melalui sudu yang bergerak. Gambar 2 memperlihatkan grafik tekanan dan kecepatan uap ketika mengalir pada nosel dan sudu. Grafik 1-2-3-4 menyatakan tekanan uap pada sisi masuk nosel, sisi keluar nosel, sisi masuk sudu dan sisi keluar sudu. Grafik 5-6-7-8 menyatakan kecepatan uap pada sisi masuk nosel, sisi keluar nosel, sisi masuk sudu dan sisi keluar sudu.

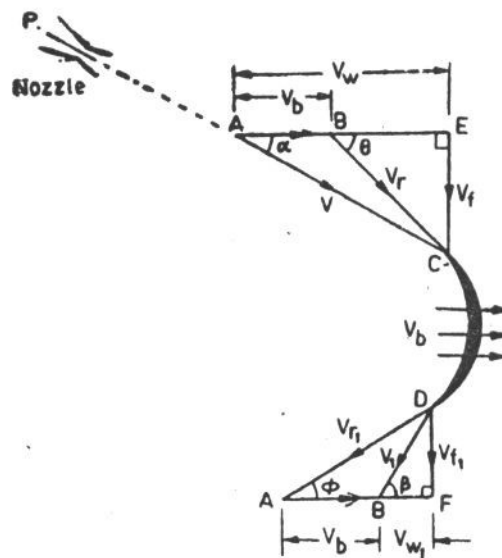


Gambar 2. Kelompok tekanan dan kecepatan uap.

Segitiga Kecepatan Bagi Sudu Bergerak Pada Turbin Impuls

Uap setelah meninggalkan nosel, menumbuk salah satu ujung sudu. Uap kemudian mengalir pada sisi permukaan dalam sudu dan akhirnya meninggalkan sudu pada ujung lainnya seperti diperlihatkan oleh gambar 3.

Semburan uap memasuki sudu pada C. Kemudian uap mengalir pada sudu dan meninggalkan sudu pada D. Segitiga kecepatan pada sisi masuk dan keluar sudu bisa digambar seperti terlihat pada gambar 3.



Gambar 3. Segitiga kecepatan turbin impuls.

- Dimana : V_b = Kecepatan linier sudu yang bergerak (AB)
 V = Kecepatan absolut uap memasuki sudu (AC)
 V_r = Kecepatan relatif uap memasuki sudu (BC). Merupakan perbedaan vektor antara V dan V_b .
 V_f = Kecepatan aliran memasuki sudu bergerak (merupakan komponen vertikal V_f)
 V_w = Kecepatan pusar pada sisi masuk sudu bergerak (merupakan komponen horisontal komponen V).
 θ = Sudut antara kecepatan relatif uap dengan sudu.
 α = Sudut antara sudu dengan uap yang memasuki sudu
 $V_l, V_{rl}, V_{fl}, V_{wl}, \beta, \phi$ = Besaran yang sama untuk sisi keluar sudu.

Dari gambar 3, PC adalah sumbu nosel. Komponen aksial V (yaitu EC) yang tidak bekerja pada sudu disebut *kecepatan aliran* (V_f). Kecepatan ini menyebabkan uap mengalir melalui turbin dan juga gaya dorong aksial pada rotor. *Kecepatan linier* atau *kecepatan sudu rata-rata* (yaitu V_b) digambarkan dengan AB dalam besar dan arah. Panjang BC merupakan kecepatan relatif (V_r) semburan uap terhadap sudu.

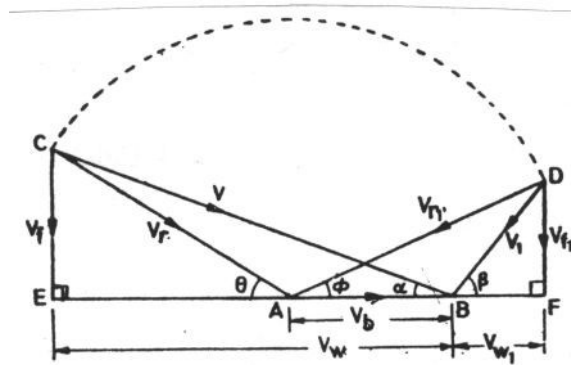
Uap meninggalkan sudu dengan kecepatan relatif (V_{rl}), yang digambarkan dengan DA . Kecepatan absolut uap (V_l) meninggalkan sudu diwakili dengan garis DB dengan sudut β dengan arah gerak sudu. Komponen tangensial V_r (diwakili oleh BF) disebut kecepatan pusar pada sisi keluar (V_{wl}). Komponen aksial V_l (diwakili oleh DF) disebut kecepatan aliran pada sisi keluar (V_{fl}).

- Catatan : 1. Segitiga kecepatan sisi masuk diwakili oleh AEC , sedangkan segitiga sisi keluar diwakili oleh AFD .
 2. Hubungan antara segitiga kecepatan sisi masuk dan sisi keluar :

$$V_r = V_{rl}$$

Segitiga Kecepatan Gabungan Untuk Sudu Bergerak

Untuk memudahkan, bisa digambar segitiga kecepatan gabungan sisi masuk dan keluar sudu seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.



Gambar 4. Segitiga kecepatan gabungan untuk turbin impuls De-lavel.

Langkah-langkah menggambar segitiga gabungan :

1. Pertama-tama, gambarlah garis horisontal, dan tandai titik AB sesuai dengan kecepatan sudu (V_b) dengan skala tertentu.
2. Pada B , gambarlah garis BC dengan sudut α dengan AB . Tandai panjang AB sesuai dengan kecepatan V (yaitu kecepatan semburan uap pada sisi masuk sudu) sesuai skala.
3. Tariklah garis AC , yang mewakili kecepatan relatif sisi masuk (V_r). Sekarang pada A gambarlah garis AD dengan sudut ϕ dengan AB .
4. Sekarang dengan A sebagai pusat dan jari-jari AC , gambarlah busur yang memotong garis ke B pada D .
5. Gambarkan garis BD yang merupakan kecepatan semburan disisi keluar (V_1) sesuai skala.
6. Dari C dan D gambarlah garis tegak lurus yang memotong garis AB pada E dan F .
7. Sekarang EB dan CE mewakili kecepatan pusar dan kecepatan aliran pada sisi masuk (V_w dan V_f) sesuai skala. Dengan cara yang sama, BF dan DF merupakan kecepatan pusar dan kecepatan aliran pada sisi keluar (V_w1 dan V_f1) sesuai skala.

Daya Yang Dihasilkan Oleh Turbin Impuls

Jika turbin impuls bekerja dengan segitiga kecepatan seperti gambar 4, misalkan:

$$W = \text{berat uap yang mengalir melalui turbin, kg/s}$$

$(V_w + V_{w1}) =$ Perubahan kecepatan pusing, m/s

Sesuai dengan hukum kedua Newton tentang gerak, gaya pada arah gerak sudu:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{W}{g} [V_w - (-V_{w1})] \\ &= \frac{W}{g} [V_w + V_{w1}] = \frac{W}{g} EF \quad \text{kg-f} \end{aligned} \quad (\text{i})$$

Kerja yang dilakukan dalam arah gerak sudu per detik:

$$\begin{aligned} &= \frac{W}{g} [V_w + V_{w1}] V_b \\ &= \frac{W}{g} \times EF \times AB \quad \text{kg.m} \end{aligned} \quad (\text{ii})$$

Daya yang dihasilkan turbin:

$$P = W \frac{(V_w + V_{w1}) V_b}{g \times 75} \quad \text{hp}$$

atau (dalam SI) : $P = W(V_w + V_{w1}) V_b \quad \text{watt}$

Gaya dorong pada roda turbin:

$$F_Y = \frac{W}{g} (V_f - V_{f1}) = \frac{W}{g} (CE - DF) \quad \text{kg}$$

Contoh soal

Pada turbin De-lavel, uap memasuki roda melalui nosel dengan kecepatan 500 m/s dan pada sudut 20° terhadap arah gerak sudu. Sudu mempunyai kecepatan 200 m/s dan sudut keluar sudu bergerak adalah 25° . Carilah sudut masuk sudu bergerak, kecepatan keluar uap dan arahnya dan kerja yang dilakukan per kg uap.

Jawab:

Diketahui: Kecepatan uap memasuki roda, $V = 500 \text{ m/s}$

Sudut nosel, $\alpha = 20^\circ$

Kecepatan sudu, $V_b = 200$ m/s

Sudut keluar sudu bergerak, $\phi = 25^\circ$

Sekarang kita gambar segitiga kecepatan gabungan seperti yang ditunjukkan oleh gambar berikut:

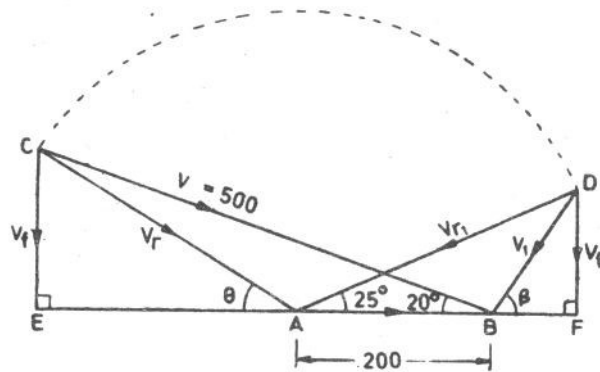


Fig. 21.5

1. Pertama-tama gambarlah garis horisontal dan potong AB yang besarnya sama dengan 200 m/s dengan menggunakan skala tertentu.
2. Pada B , gambar garis BC dengan sudut 20° (sudut nosel) dan potong BC yang besarnya sama dengan 500 m/s sesuai skala yang merupakan kecepatan uap memasuki sudu (V).
3. Buat garis AC , yang merupakan kecepatan relatif pada sisi masuk.
4. Pada A , gambar garis AD dengan sudut 25° (sudut keluar dari sudu bergerak). Dengan A sebagai pusat, dan jari-jari sama dengan AC , gambarlah busur yang akan memotong garis AD pada D .
5. Sambungkan BD , yang merupakan kecepatan jet sisi keluar.
6. Pada C dan D , masing-masing gambarlah garis tegak lurus terhadap AB pada E dan F .

Harga-harga berikut diperoleh dari diagram kecepatan di atas:

$$\theta = 32^\circ ; \beta = 59^\circ ; V_1 = 175 \text{ m/s}$$

$$V_w = 470 \text{ m/s} ; \text{ dan } V_{w1} = 90 \text{ m/s}$$

Sudut masuk sudu bergerak

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh sudut masuk sudu bergerak:

$$\theta = 32^{\circ}$$

Kecepatan keluar uap

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh kecepatan keluar uap:

$$V_1 = 175 \text{ m/s}$$

Arah keluar uap

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh arah uap keluar:

$$\beta = 59^{\circ}$$

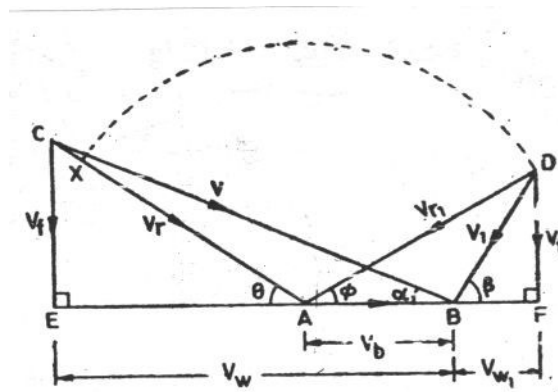
Kerja per kg air

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{g} (V_w + V_{w1}) V_b \\ &= \frac{1}{9,81} (470 + 90) 200 = 11.420 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

Pengaruh Gesekan Pada Segitiga Kecepatan Gabungan

Pada kenyataannya terdapat gesekan pada permukaan sudu dimana uap mengalir. Efek gesekan ini akan mengurangi kecepatan relatif uap. Atau dengan kata lain, untuk membuat V_{r1} kurang dari V_r . Rasio V_r terhadap V_{r1} disebut sebagai *koefisien kecepatan sudu* atau koefisien kecepatan atau faktor gesekan, (biasanya dilambangkan dengan K). Secara matematik, koefisien kecepatan sudu adalah :

$$K = \frac{V_{r1}}{V_r}$$



Gambar 6. Efek gesekan pada segitiga kecepatan gabungan.

Efek gesekan pada segitiga kecepatan gabungan diperlihatkan dengan berkurangnya kecepatan relatif pada sisi keluar (V_{r1}) seperti yang diperlihatkan gambar 6.

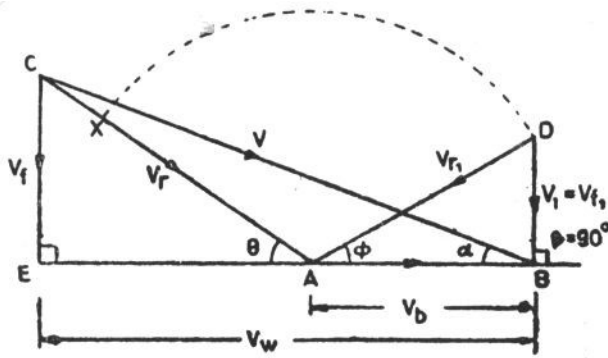
Catatan : 1. Karena V_{r1} menurun karena gesekan, maka kerja yang dilakukan per kg uap juga menurun.

2. Harga K bervariasi dari 0,75 sampai 0,85, tergantung pada bentuk sudu.

Diagram Kecepatan Gabungan Untuk Aliran Aksial

Kadang-kadang uap meninggalkan sudu pada ujungnya pada sudut 90° terhadap arah gerak sudu. Pada kondisi ini turbin dikatakan mempunyai keluaran/aliran aksial. Diagram kecepatan gabungan untuk aliran aksial digambarkan pada gambar 7. Perlu dicatat bahwa kecepatan pusar pada sisi keluar untuk jenis turbin ini (V_{w1}) adalah nol, karenanya kerja turbin adalah:

$$= \frac{W}{g} V_w V_b$$



Gambar 7. Diagram kecepatan gabungan untuk keluaran aksial.

Contoh soal

Kecepatan uap meninggalkan nosel sebuah turbin impuls adalah 1.200 m/s dan sudut nosel adalah 20° . Kecepatan sudu adalah 375 m/s dan koefisien kecepatan sudu adalah 0,75. Dengan mengasumsikan tidak ada kerugian karena kejut pada sisi masuk, aliran massa 0,5 kg/s dan sudu simetris, hitunglah: (a) sudut masuk sudu, (b) gaya dorong roda, (c) gaya aksial pada roda, dan (d) daya yang dihasilkan turbin.

Jawab

Diketahui: Kecepatan uap memasuki sudu, $V = 1.200$ m/s

Sudut nosel, $\alpha = 20^\circ$

Kecepatan sudu, $V_b = 375$ m/s

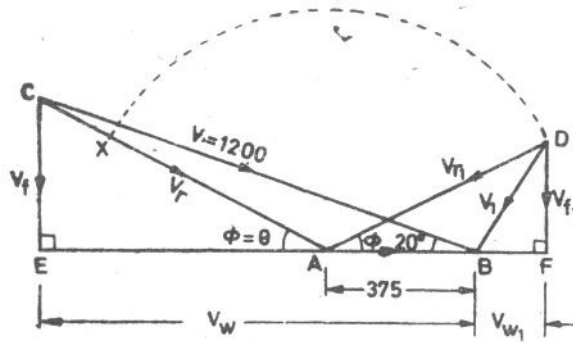
Koefisien kecepatan sudu:

$$K = \frac{V_{r1}}{V_r} = 0,75$$

Massa uap, $W = 0,5$ kg/s

Karena sudu simetris maka:

$$\theta = \phi$$



Sekarang kita gambar segitiga kecepatan gabungan seperti yang ditunjukkan oleh gambar di atas:

1. Pertama-tama gambarlah garis horisontal dan potong AB yang besarnya sama dengan 375 m/s dengan menggunakan skala tertentu yang merupakan kecepatan sudu (V_b).
2. Pada B , gambar garis BC dengan sudut 20° (sudut nosel) dan potong BC yang besarnya sama dengan 1200 m/s sesuai skala yang merupakan kecepatan uap memasuki sudu (V).
3. Buat garis AC , yang merupakan kecepatan relatif pada sisi masuk.
Dengan pengukuran, kita peroleh $CA = V_r = 860$ m/s. Sekarang potong AX yang besarnya $860 \times 0,75 = 645$ m/s, sesuai skala yang merupakan kecepatan relatif sisi keluar.
4. Pada A , gambar garis AD dengan sudut ϕ (sama dengan sudut θ). Dengan A sebagai pusat, dan jari-jari sama dengan AX , gambarlah busur yang akan memotong garis AD pada D .
5. Sambungkan BD , yang merupakan kecepatan jet sisi keluar (V_1).
6. Pada C dan D , masing-masing gambarlah garis tegak lurus terhadap AB pada E dan F .

Harga-harga berikut diperoleh dari diagram kecepatan di atas:

$$\theta = 29^\circ ; V_w = 1.130 \text{ m/s} ; V_{w1} = 190 \text{ m/s}$$

$$V_f = 410 \text{ m/s} ; \text{ dan } V_{f1} = 310 \text{ m/s}$$

a. Sudut masuk sudu

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh sudut masuk sudu:

$$\theta = 29^\circ$$

b. Gaya dorong roda

Misalkan F_x = gaya dorong roda

$$F_x = \frac{W}{g}(V_w + V_{wl})$$

$$= \frac{0,5}{9,81}(1.130 + 190) = 67,3$$

c. Gaya aksial pada roda

Misalkan F_y = gaya aksial pada roda

$$F_y = \frac{W}{g}(V_f - V_{wf})$$

$$= \frac{0,5}{9,81}(410 - 310) = 5,1$$

d. Daya yang dihasilkan turbin

Misalkan P = daya yang dihasilkan turbin

$$P = \frac{W(V_w + V_{wl})V_b}{g \times 75}$$

$$= \frac{0,5(1.130 + 190) \times 375}{9,81 \times 75} = 336,4 \text{ hp}$$

Contoh soal

Jet uap memasuki barisan sudu dengan kecepatan 375 m/s pada sudut 20° terhadap arah gerak sudu. Jika kecepatan sudu adalah 165 m/s, carilah sudut sudu sisi masuk dan keluar dengan mengasumsikan tidak ada gaya aksial pada sudu. Kecepatan uap melewati sudu berkurang sebesar 15%. Cari juga daya yang dihasilkan oleh turbin per kg uap yang mengalir pada sudu setiap detiknya.

Jawab

Diketahui: Kecepatan uap memasuki sudu, $V = 375$ m/s

Sudut nosel, $\alpha = 20^\circ$

Kecepatan sudu, $V_b = 165$ m/s

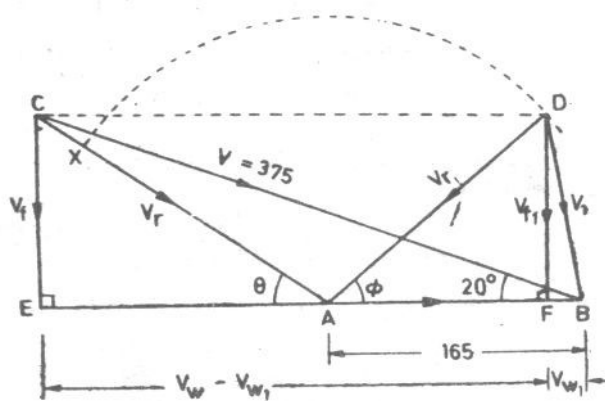
Penurunan kecepatan jet ketika melalui sudu = 15%

Maka : $V_{r1} = 0,85 V_r$

Karena tidak ada gaya aksial pada sudu maka:

$$V_f = V_{f1}$$

Sekarang kita gambar segitiga kecepatan gabungan seperti yang ditunjukkan oleh gambar di berikut:



1. Pertama-tama gambarlah garis horisontal dan potong AB yang besarnya sama dengan 165 m/s dengan menggunakan skala tertentu yang merupakan kecepatan sudu (V_b).
2. Gambar segitiga kecepatan sisi masuk ABC pada AB dengan $\alpha = 20^\circ$ dan $V = 375$ m/s sesuai skala. Dari segitiga kecepatan diperoleh $V_f = 130$ m/s dan $V_r = 230$ m/s.
3. Dengan cara yang sama, gambarlah segitiga kecepatan sisi keluar ABD pada dasar sama AB dengan $V_{r1} = 0,85 V_r = 0,85 \times 230 = 195,5$ m/s sesuai skala dan $V_{f1} = V_f = 130$ m/s.
4. Pada C dan D , masing-masing gambarlah garis tegak lurus terhadap AB pada E dan F . Dari bentuk gambar, kita dapatkan bahwa V_{w1} mempunyai arah yang berlawanan dengan V_w .

Harga-harga berikut diperoleh dari diagram kecepatan di atas:

$$\theta = 34^\circ ; \quad \phi = 41^\circ ; \quad \text{dan } (V_w - V_{w1}) = 320 \text{ m/s}$$

Sudut sudu sisi masuk dan keluar

Dari pengukuran diagram kecepatan, diperoleh sudut sisi masuk sudu:

$$\theta = 34^\circ$$

dan sudut sisi keluar sudu:

$$\phi = 41^\circ$$

Daya yang dihasilkan turbin

Diketahui berat uap yang mengalir pada sudu adalah, $W = 1 \text{ kg/s}$

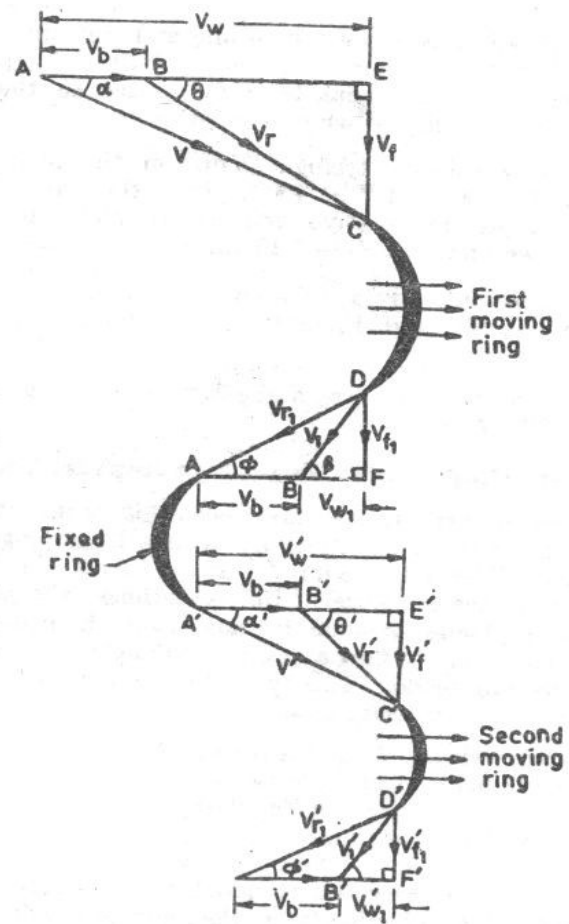
Misalkan $P =$ daya yang dihasilkan turbin

$$\begin{aligned} P &= W (V_w - V_{w1}) V_b \\ &= 1 (320) \times 165 = 52.800 \text{ W} \\ &= 52,8 \text{ kW} \end{aligned}$$

Diagram Kecepatan Untuk Turbin Impuls Dua Tingkat

Pada pembicaraan sebelumnya, kita telah membahas turbin impuls dimana uap setelah keluar dari nosel menumbuk salah satu ujung sudu, meluncur pada permukaan dalam, meninggalkan sudu dan keluar ke kondenser. Tetapi kadang-kadang, uap setelah meninggalkan sudu bergerak dibuat mengalir ke cincin tetap (supaya uap mengalir pada sudut tertentu) dan kembali menumbuk sudu bergerak kedua. Jenis turbin ini disebut turbin impuls dua tingkat, dimana segitiga kecepatannya diperlihatkan pada gambar 10.

Perlu dicatat bahwa kecepatan sudu (V_b) konstan pada kedua tingkat. Kecepatan absolut pada sisi keluar sudu bergerak pertama adalah kecepatan masuk pada cincin sudu tetap (fixed ring) dan kecepatan keluar dari cincin tetap adalah kecepatan masuk cincin sudu bergerak kedua.



Gambar 10. Turbin impuls dua tingkat.

besarnya sama dengan kecepatan uap memasuki cincin bergerak kedua (V_r').

6. Sekarang gambarlah segitiga kecepatan masuk ABC' untuk cincin bergerak kedua pada basis AB dengan bantuan sudut nosel cincin bergerak kedua (α') dan kecepatan uap memasuki cincin bergerak kedua (V').
7. Sekarang potong $C'Z$ sebesar gesekan sudu pada cincin bergerak kedua. Panjang AZ akan memberikan harga kecepatan relatif pada sisi keluar cincin bergerak kedua (V_{r1}').
8. Sekarang gambarlah segitiga kecepatan sisi keluar ABD' untuk cincin bergerak kedua pada basis AB dengan bantuan sudut sudu sisi keluar cincin bergerak kedua (ϕ') dan kecepatan keluar dari cincin bergerak kedua (V_{r1}').

Daya yang dihasilkan turbin impuls dua tingkat adalah :

- Dalam satuan MKS :

$$P = \frac{WV_b}{g \cdot 75} (EF + E'F') \text{ hp}$$

- Dalam satuan SI :

$$P = WV_b(EF + E'F') \text{ watt}$$

B. Turbin Reaksi

Pada turbin reaksi, uap masuk ke roda dengan tekanan tertentu dan mengalir pada sudu. Uap ketika meluncur, memutar sudu dan membuatnya bergerak. Kenyataannya, runner turbin berotasi karena gaya reaktif semburan uap.

Turbin Reaksi Parson

Turbin Parson adalah jenis turbin reaksi yang paling sederhana dan banyak digunakan. Turbin mempunyai komponen-komponen utama sebagai berikut: