

KOMPRESOR UDARA

Kompresor udara adalah sebuah mesin yang mengkompresi udara dan menaikkan tekanannya. Kompresor udara menghisap udara dari udara atmosfer, mengkompresinya dan kemudian menghantarkannya pada tekanan tinggi pada sebuah bejana penyimpan.

Klasifikasi Kompresor Udara

1. Berdasarkan kerja.
 - a. Kompresor torak.
 - b. Kompresor rotari/putar.
2. Berdasarkan gerakan.
 - a. Kompresor gerakan tunggal.
 - b. Kompresor gerakan ganda.
3. Berdasarkan jumlah tingkat.
 - a. Kompresor tingkat satu.
 - b. Kompresor tingkat jamak.

Istilah-istilah

1. Tekanan masuk.

Adalah tekanan mutlak kompresor udara pada sisi masuk kompresor.
2. Tekanan hantar/buang.

Adalah tekanan mutlak udara pada sisi keluar kompresor.
3. Rasio kompresi (atau rasio tekanan).

Adalah rasio tekanan hantar terhadap tekanan sisi masuk.
4. Kapasitas kompresor.

Adalah volume udara yang dihasilkan oleh kompresor dan dinyatakan dalam m^3/min atau m^3/s .
5. Free air delivery (Hantaran udara bebas).

Adalah volume aktual yang dihasilkan kompresor jika diukur pada kondisi temperatur dan tekanan normal.

6. Volume sapuan.

Adalah volume udara yang dihisap oleh kompresor selama langkah hisap.

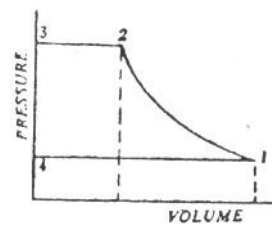
7. Tekanan efektif rata-rata.

Selama langkah torak, tekanan udara selalu berubah-ubah. Tekanan efektif rata-rata dicari dengan cara matematik yaitu membagi kerja per siklus dengan volume langkah.

A. KOMPRESOR TORAK

Single Stage Compressor tanpa Clearance

Operasi kompresor ini dapat dilihat pada gambar 1. Kompresi akan mengikuti kurva 1-2. Kerja yang dilakukan per siklus adalah = W



Gambar 9.1. Kurva p-v

a. Jika kompresi mengikuti hukum $PV^n = \text{konstan}$,

$$\begin{aligned}
 W &= p_2 v_2 + \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{n-1} - p_1 v_1 \\
 &= \frac{n}{n-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{n}{n-1} mR(T_2 - T_1) \\
 &= \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]
 \end{aligned}$$

$$\text{atau} \quad W = \frac{n}{n-1} mR(T_2 - T_1)$$

b. Jika kompresi adalah adiabatik:

$$\begin{aligned} W &= \frac{\gamma}{\gamma-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) \\ &= \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \\ &= \frac{\gamma}{\gamma-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{atau} \quad W &= \frac{\gamma}{\gamma-1} mR(T_2 - T_1) \\ &= m.C_p(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

c. Jika kompresi adalah isothermal:

$$\begin{aligned} W &= p_1 v_1 \ln \frac{v_1}{v_2} \\ &= p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \end{aligned}$$

$$\text{atau} \quad W = mRT_1 \ln \frac{v_1}{v_2}$$

Contoh soal

Kompresor udara jenis torak satu tingkat digunakan untuk mengkompresi 60 meter kubik udara dari 1 bar ke 8 bar pada 22^o C. Carilah kerja yang dilakukan, jika kompresi pada udara adalah: (I) isothermal, (ii) adiabatik dengan indeks adiabatik 1,4 dan (iii) politropik dengan indeks politropik 1,25.

Jawab:

Diketahui: $v_1 = 60 \text{ m}^3$; $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $p_2 = 8 \text{ bar} = 8 \times 10^5 \text{ N/m}^2$;
 temperatur udara = 22°C ; $\gamma = 1,4$; $n = 1,25$;

(i) *kompresi isothermal*

$$W = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$= 1 \times 10^5 \times 60 \times \ln \left(\frac{8}{1} \right) = 12,5 \times 10^6 \text{ Nm}$$

(ii) *kompresi adiabatik*

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1,4}{1,4 - 1} \times 1 \times 10^5 \times 60 \left[8^{\frac{1,4 - 1}{1,4}} - 1 \right]$$

$$= 17 \times 10^6 \text{ Nm}$$

(iii) *kompresi politropik*

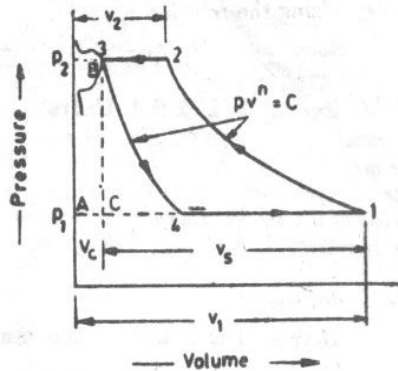
$$W = \frac{n}{n - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n - 1}{n}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1,25}{1,25 - 1} \times 1 \times 10^5 \times 60 \left[8^{\frac{1,25 - 1}{1,25}} - 1 \right]$$

$$= 15,1 \times 10^6 \text{ Nm}$$

Single Stage Compressor dengan Clearance

Kerja yang dilakukan per siklus apabila hukum kompresi dan ekspansi mengikuti:



Gambar 9.2. Diagram p -v dengan clearance.

$$\begin{aligned}
 W &= \text{Luas daerah 1-2-3-4} \\
 &= (\text{luas daerah A-1-2-B}) - (\text{luas daerah A-4-3-B}) \\
 &= \frac{n}{n-1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] - \frac{n}{n-1} \times p_1 v_4 \left[\left(\frac{p_3}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\
 &= \frac{n}{n-1} p_1 (v_1 - v_4) \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\
 &= \frac{n}{n-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]
 \end{aligned}$$

Contoh soal

kompresor udara torak aksi tunggal satu tingkat mempunyai diameter silinder 200 mm dan langkah 300 mm. Kompresor menerima udara pada 1 bar dan 20⁰ C dan mengeluarkan udara pada 5,5 bar. Jika kompresi mengikuti persamaan $pv^{1.3} = C$ dan volume clearance 5 persen dari volume

langkah, carilah daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor jika kompresor beroperasi pada 500 rpm.

Jawab

Diketahui: diameter silinder = 200 mm = 0,2 m ; panjang langkah = 300 mm = 0,3 m ; $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $T_1 = 20^\circ \text{ C} = 293^\circ \text{ K}$; $p_2 = 5,5 \text{ bar} = 5,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$; $n = 1,3$; $N = 500 \text{ rpm}$;

$$\text{Volume langkah} = \frac{\pi}{4} \times 0,2^2 \times 0,3 = 0,00942 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} v_c &= 5\% \times \text{volume langkah} \\ &= 0,05 \times 0,00942 = 0,00047 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{volume awal : } v_1 = 0,00942 + 0,00047 = 0,00989 \text{ m}^3$$

maka:

$$\begin{aligned} v_4 &= v_c \times \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,00047 \times \left(\frac{5,5}{1} \right)^{\frac{1}{1,3}} \\ &= 0,00174 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

volume sapuan :

$$(v_1 - v_4) = 0,00989 - 0,00174 = 0,00815 \text{ m}^3$$

dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} W &= \frac{n}{n-1} p_1 (v_1 - v_4) \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\ &= \frac{1,3}{1,3-1} \times 1 \times 10^5 \times 0,00815 \left[\left(\frac{5,5}{1} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} - 1 \right] \\ &= 1.702 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor:

$$\begin{aligned} P &= W \times N = 1.702 \times \frac{500}{60} = 14.190 \text{ W} \\ &= 14,19 \text{ kW} \end{aligned}$$

Indicated Horse Power

Bila N menyatakan kecepatan poros engkol, maka jumlah langkah kerja (N_w) adalah:

$N_w = N$ untuk kompresor aksi tunggal

$N_w = 2N$ untuk kompresor aksi ganda

$$IHP = \frac{W \times \text{jumlah langkah kerja}}{4500}$$

Bila W diambil dari persamaan b , maka disebut *adiabatic h.p.* dan jika W diambil dari persamaan c , maka dinamakan *isothermal h.p.*

Indicated horse power (IHP) biasa juga dikenal sebagai *air horse power* (AHP).

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor disebut *shaft horse power* (SHP) atau *brake horse power* (BHP). Jadi dalam suatu kompresor BHP selalu lebih besar daripada IHP.

Efisiensi Kompresor

$$\text{Efisiensi mekanik} = \frac{\text{indicated HP}}{\text{Brake HP}}$$

$$\text{Efisiensi isothermal} = \frac{\text{isothermal work done}}{\text{Indicated work done}}$$

Ini biasa juga disebut sebagai *indicated isothermal efficiency*, *compressor efficiency* atau *compression efficiency*.

$$\text{Efisiensi isothermal keseluruhan} = \frac{\text{isothermal HP}}{\text{Shaft HP}}$$

$$\text{Efisiensi adiabatik keseluruhan} = \frac{\text{adiabatik HP}}{\text{Shaft HP}}$$

$$\text{Efisiensi Volumetrik} = \frac{\text{volume of free air delivered}}{\text{Volume sapuan torak}}$$

Free air delivered (FAD) dipergunakan untuk menyatakan volume udara pada tekanan dan temperatur masuk ke dalam kompresor.

Contoh soal

Kompresor udara torak aksi tunggal mempunyai diameter silinder 200 mm dan langkah 300 mm. Kompresor menghisap udara pada 1 kg/cm^2 dan 27°C dan melepaskan udara pada 8 kg/cm^2 pada kecepatan 100 rpm. Carilah (i) daya IHP kompresor, (ii) massa udara yang dilepaskan kompresor per menit, (iii) temperatur udara yang keluar dari kompresor. Kompresi mengikuti persamaan $p v^{1,25} = C$. Ambil harga $R = 29,3 \text{ m/kg}^0\text{K}$.

Jawab

Diketahui: diameter silinder = 200 mm = 0,2 m ; panjang langkah = 300 mm = 0,3 m ; $p_1 = 1 \text{ kg/cm}^2 = 1 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $T_1 = 27^\circ \text{C} = 300^\circ \text{K}$; $p_2 = 8 \text{ kg/cm}^2 = 8 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $n = 1,25$; $N = 100 \text{ rpm}$; $R = 29,3 \text{ kg m/kg}^0\text{K}$.

$$\text{Volume langkah} = \frac{\pi}{4} \times 0,2^2 \times 0,3 = 0,00942 \text{ m}^2$$

Karena kompresor adalah jenis aksi tunggal maka jumlah langkah:

$$N_w = N = 100$$

(i) *Daya kuda indikated dari kompresor*

Dengan menggunakan persamaan:

$$\begin{aligned} W &= \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\ &= \frac{1,25}{1,25-1} \times 1 \times 10^4 \times 0,0094 \left[\left(\frac{8}{1} \right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} - 1 \right] \\ &= 242,5 \text{ kg-m} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{IHP} = \frac{W \times N}{4500} = \frac{242,5 \times 100}{4500} = 5,39 \text{ hp}$$

(ii) *massa udara yang dikeluarkan kompresor per menit:*

$$p_1 v_1 = m R T_1$$

$$1 \times 10^4 \times 0,0094 = m \times 29,3 \times 300$$

$m = 0,0107$ kg per langkah.

∴ massa yang dikeluarkan per menit:

$$= m \times N_w = 0,0107 \times 100 = 0,107 \text{ kg}$$

(iii) Temperatur udara yang keluar dari kompresor:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\frac{T_2}{300} = \left(\frac{8}{1} \right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} = 8^{0,2} = 1,516$$

$$T_2 = 1,516 \times 300 = 454,8 \text{ } ^\circ\text{K} = 181,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kompresor Bertingkat Banyak

Dalam suatu kompresor bertingkat banyak, udara mula-mula masuk ke dalam silinder tekanan rendah/low pressure cylinder (LP cylinder) untuk dimampatkan. Kemudian udara tadi masuk ke dalam silinder bertekanan menengah/intermediate pressure cylinder untuk dimampatkan lagi. Akhirnya udara tersebut dikompresikan lagi ke dalam silinder bertekanan tinggi/high pressure cylinder (HP cylinder) untuk di delivery.

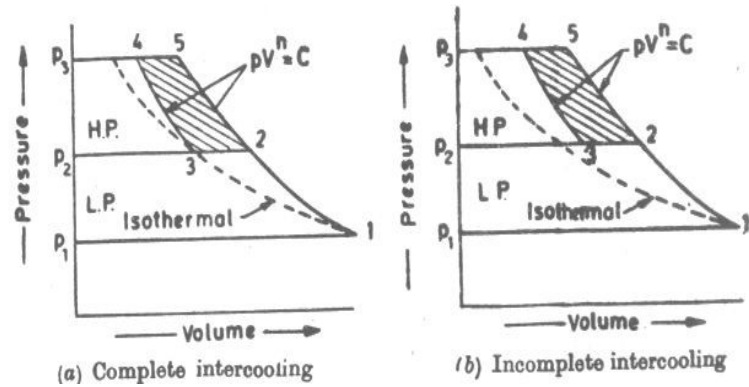
Dengan mengabaikan *clearance* dan kemudian menggunakan hukum untuk kompresi :

$$pv^n = \text{konstan}$$

Kita dapat memperoleh suatu diagram $p-v$ untuk suatu kompresor dua tingkat seperti gambar 9.3.

Pendinginan antara sempurna atau *complete intercooling* adalah ketika udara yang meninggalkan *intercooler* (T_3) adalah sama dengan temperatur udara atmosfer awal (T_1). Dalam hal ini, titik 3 terletak pada kurva isotermal seperti yang ditunjukkan gambar 9.3a.

Pendinginan antara tidak sempurna adalah jika udara yang meninggalkan *intercooler* (T_3) lebih tinggi dari temperatur udara atmosfer awal. Dalam hal ini, titik 3 terletak pada sisi kanan kurva isotermal seperti yang ditunjukkan gambar 9.3b.



Gambar 9.3. Pendinginan antara udara.

Kerja kompresor dua tingkat:

a. Pada pendinginan antara tidak sempurna:

$$W = \frac{n}{n-1} \left[p_1 v_1 \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} + p_2 v_2 \left\{ \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \right]$$

b. Pada pendinginan sempurna:

$$W = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right]$$

$$W = \frac{n}{n-1} mRT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right]$$

Untuk mengurangi kerja, udara didinginkan setelah dikompresi oleh kompresor. Jika p_2 adalah tekanan menengah, maka:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_3} \quad \text{atau} \quad P_2 = \sqrt{P_1 \cdot P_3}$$

Untuk tiga tingkat :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_3} = \frac{P_3}{P_4}$$

Jadi untuk x tingkat berlaku:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{P_3} = \dots = \frac{P_x}{P_{x+1}}$$

Untuk satu tingkat:

$$W = \frac{1n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{1n}} - 1 \right]$$

Kerja minimum dengan *intercooling*:

Untuk dua tingkat:

$$W = \frac{2n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right]$$

Untuk tiga tingkat:

$$W = \frac{3n}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_4}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{3n}} - 1 \right]$$

Untuk x tingkat:

$$W = \frac{xn}{n-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_{x+1}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{xn}} - 1 \right]$$

Efisiensi volumetrik keseluruhan :

$$= \frac{\text{volume udara yang dibuang pada tekanan dan suhu masuk}}{\text{Volume langkah silinder tekanan rendah}}$$

$$\text{Efisiensi volumetrik absolut} = \frac{\text{Volume udara yang dibuang pada NTP}}{\text{Volume langkah silinder tekanan rendah}}$$

Catatan : NTP adalah singkatan dari Normal Temperatur and Pressure.

Contoh soal

Perkirakanlah kerja yang diperlukan oleh kompresor udara aksi tunggal dua tingkat yang mengkompresi 2,8 m³ udara per menit pada 1,05 kg/cm² abs dan 10⁰ C hingga tekanan 35 kg/cm² abs. Receiver antara mendinginkan udara ke 30⁰ C dan tekanan 5,6 kg/cm². Ambil n udara 1,4.

Jawab

Diketahui: $v_1 = 2,8 \text{ m}^3$; $p_1 = 1,05 \text{ kg/cm}^2 = 1,05 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $T_1 = 10^0 \text{ C} = 283^0 \text{ K}$; $p_3 = 35 \text{ kg/cm}^2 = 35 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $T_2 = 30^0 \text{ C} = 303^0 \text{ K}$; $p_2 = 5,6 \text{ kg/cm}^2 = 5,6 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $n = 1,4$

$$\text{dari: } \frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$

$$v_2 = \frac{p_1 v_1 \times T_2}{p_2 \times T_1} = \frac{1,05 \times 10^4 \times 2,8 \times 303}{5,6 \times 10^4 \times 283}$$

$$= 0,562 \text{ m}^3$$

Dengan menggunakan persamaan:

$$W = \frac{n}{n-1} \left[p_1 v_1 \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} + p_2 v_2 \left\{ \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right\} \right]$$

$$W = \frac{1,4}{1,4-1} \left[1,05 \times 10^4 \times 2,8 \left\{ \left(\frac{5,6}{1,05} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right\} + 5,6 \times 10^4 \times 0,562 \left\{ \left(\frac{35}{5,6} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right\} \right]$$

=13.915 kg-m/min

B. KOMPRESOR ROTARI

Perbandingan Kompresor Torak dengan Rotari

Berikut ini perbandingan utama antara kompresor udara jenis torak dan rotari:

No.	Kompresor Torak	Kompresor Rotari
1.	Tekanan buang maksimum dapat mencapai 1.000 kg/cm ²	Tekanan buang maksimum hanya 10 kg/cm ²
2.	Kapasitas udara maksimum yang di kompresi sekitar 300 m ³ /min	Kapasitas udara maksimum dapat mencapai 3000 m ³ /min
3.	Cocok untuk kapasitas udara rendah dan tekanan tinggi.	Cocok untuk kapasitas besar pada tekanan rendah.
4.	Kecepatan kompresor rendah.	Kecepatan kompresor tinggi.
5.	Suplai udara terputus-putus.	Suplai udara kontinyu.
6.	Ukuran kompresor besar untuk kapasitas tertentu.	Ukuran kompresor kecil untuk kapasitas yang sama.
7.	<i>Balancing</i> merupakan masalah utama.	Tidak ada permasalahan <i>balancing</i> .
8.	Sistem pelumasan rumit.	Sistem pelumasan sederhana.
9.	Udara yang dilepaskan kurang bersih, karena kontak dengan minyak pelumas.	Udara yang dilepaskan lebih bersih, karena tidak kontak dengan minyak pelumas.
10.	Efisiensi isothermal digunakan untuk semua jenis perhitungan.	Efisiensi isentropik digunakan untuk semua jenis perhitungan.

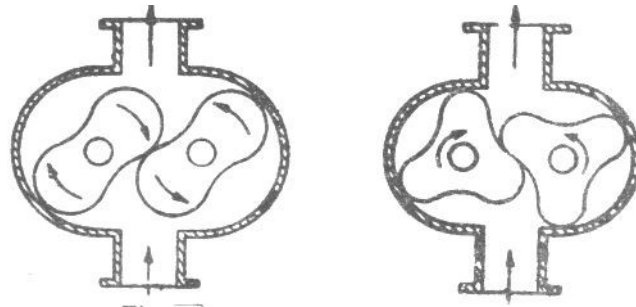
Jenis-jenis Kompresor Rotari

Ada berbagai jenis kompresor rotari, berikut ini jenis-jenis yang sering digunakan:

1. *Root blower compressor*.
2. *Vane blower compressor*.
3. Kompresor blower sentrifugal.
4. Kompresor aliran aksial.

Dua jenis pertama dikenal sebagai “kompresor perpindahan positif” (positive displacement compressors), sedangkan dua lainnya dikenal dengan 'kompresor perpindahan non-positif'.

Root Blower Compressor



Gambar 9.4 Root blower compressor.

Sebuah kompresor blower *root* (root blower compressor), dalam bentuk yang paling sederhana, terdiri dari dua rotor dengan *lobe* (sudu) yang berputar dan mempunyai saluran masuk dan buang. Cara kerja kompresor ini mirip dengan cara kerja pompa roda gigi. Terdapat berbagai desain dari roda, namun umumnya kompresor mempunyai dua atau tiga lobe. Namun prinsip kerjanya sama, seperti yang ditunjukkan pada gambar 9.4 (a) dan (b). Lobe di desain sedemikian sehingga kedap udara (rapat) pada titik singgung dengan rumahnya.

Ketika rotor berputar, udara pada tekanan atmosfer terperangkap pada ruang yang terbentuk antara lobe dan rumahnya. Gerakan berputar dari lobe akan membuang udara yang terperangkap ke *receiver* (penampung udara). Sehingga makin banyak udara yang masuk ke *receiver* maka makin naik tekanannya, yang pada akhirnya tekanan tinggi akan dihasilkan oleh *receiver*.

Menarik untuk diketahui bahwa ketika lobe berputar dan saluran keluar terbuka, udara (bertekanan tinggi) dari *receiver* mengalir kembali ke ruang kompresor dan tercampur dengan udara yang terperangkap. Aliran balik berlanjut sampai tekanan di ruang lobe sama dengan tekanan di *receiver*.

Kerja teoritis untuk mengkompresi udara adalah:

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad \dots (i)$$

dimana: p_1 = tekanan udara masuk

p_2 = tekanan udara keluar

γ = indkes adiabiatic udara

v_1 = volume udara yang di kompresi

dan kerja sebenarnya:

$$= v_1 (p_2 - p_1) \quad \dots \text{(ii)}$$

\therefore efisiensi blower root:

$$\eta = \frac{\frac{\gamma}{\gamma-1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{v_1 (p_2 - p_1)}$$

$$= \frac{\gamma}{\gamma-1} \times \frac{\left[r^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}{(\gamma-1)}$$

dimana r adalah rasio tekanan (p_2 / p_1). Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor dapat dihitung dari kerja yang dilakukan.

- Catatan:**
1. Kadang-kadang udara dengan tekanan tinggi diperoleh dengan menempatkan dua atau lebih blower root dalam susunan seri, dan dengan menggunakan pendingin antara diantara masing-masing tingkat.
 2. Udara dibuang empat kali dalam satu putaran jika rotornya terdiri dari dua lobe. Dengan cara yang sama, udara dibuang enam kali dalam satu putaran jika rotornya terdiri dari 3 lobe.

Contoh soal

Kompresor jenis *root blower* mengkompresi $0,05 \text{ m}^3$ udara dari $1,0 \text{ kg/cm}^2$ ke $1,5 \text{ kg/cm}^2$ per putaran. Carilah efisiensi kompresor.

Jawab:

Diketahui: $v_1 = 0,05 \text{ m}^3$; $p_1 = 1,0 \text{ kg/cm}^2 = 1,0 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $p_2 = 1,5 \text{ kg/cm}^2 = 1,5 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$

Kerja per putaran:

$$W_1 = v_1(p_2 - p_1) = 0,05(1,5 \times 10^4 - 1,0 \times 10^4)$$

$$= 250 \text{ kg-m}$$

kerja ideal per putaran:

$$W_2 = \frac{\gamma}{\gamma - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1,4}{1,4 - 1} \times 1,0 \times 10^4 \times 0,05 \left[\left(\frac{1,5}{1,0} \right)^{\frac{1,4 - 1}{1,4}} - 1 \right]$$

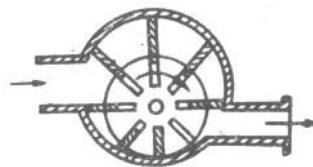
$$= 215 \text{ kg-m}$$

∴ efisiensi kompresor:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{215}{250} = 0,86 = 86 \%$$

Kompresor Vane Blower

Kompresor *Vane Blower* adalah bentuk paling sederhana kompresor rotari dimana dimana terdiri dari sebuah piringan berputar secara eksentrik di dalam sebuah rumah kompresor kedap udara dengan saluran masuk dan keluar. Piringan mempunyai beberapa slot (umumnya 4 sampai 8) yang mempunyai *vane*. Ketika rotor memutar piring, vane tertekan ke arah rumah kompresor karena gaya sentrifugal, membentuk kantong udara.



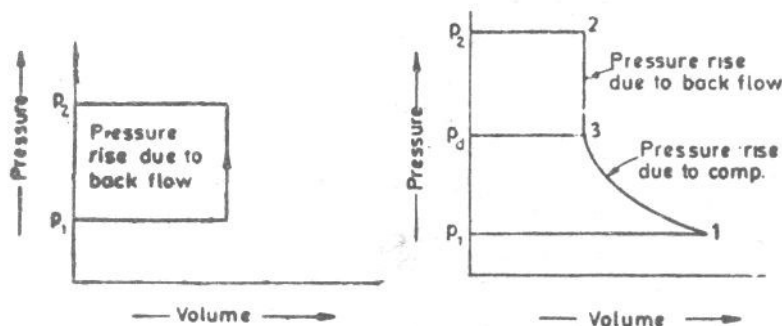
Gambar 9.5. Kompresor vane blower.

Energi mekanik diberikan ke piringan oleh sumber dari luar. Ketika piring berputar, udara terperangkap di dalam kantong yang terbentuk antara vane dan rumah kompresor. Pertama-tama, gerak putar vane mengkompresi

udara, ketika vane yang berputar membuka saluran masuk, sejumlah udara (di bawah tekanan tinggi) mengalir kembali ke dalam kantong dengan cara yang sama dengan kompresor *root blower*. Sehingga tekanan udara, yang terperangkap di dalam kantong, pertama-tama meningkat karena volume yang berkurang dan kemudian dengan aliran balik udara, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 9.5. Kemudian udara dilepaskan ke *receiver* oleh rotasi vane. Terakhir, udara tekanan tinggi dilepaskan oleh *receiver*.

Aliran Balik Pada Kompresor Udara Perpindahan Positif

Pada kompresor blower jenis *root* atau jenis *vane*, ketika *lobe* atau *vane* berputar dan membuka saluran keluar, sebagian udara tekanan tinggi dari *receiver* mengalir balik ke ruang/kantong antara *lobe* dengan rumah kompresor atau *vane* dengan rumah kompresor. Udara balik dari *receiver* ini bercampur dengan udara terperangkap dari sisi hisap sampai tekanan di kantong sama dengan tekanan di *receiver*. Karena itu tekanan udara yang dilepaskan ke *receiver* dari kantong udara adalah sama dengan tekanan udara di *receiver*. Proses aliran balik udara adalah proses *irreversible* dan disebut kompresi ireversibel.



Gambar 9.6. Diagram $p - v$ kompresor udara.

Perlu dicatat bahwa kenaikan tekanan pada kompresor blower *root* semata-mata disebabkan oleh aliran balik, dan proses ini dijelaskan pada gambar 9.6 (a).

Kenaikan tekanan pada kompresor blower *vane* terjadi pertama-tama karena kompresi dan kemudian karena aliran balik, seperti ditunjukkan oleh gambar 9.6 (b). Kompresor blower *root* hanya ada di dunia akademik saja, namun kompresor blower *vane* telah digunakan, tetapi tidak terlalu sukses.

Misalkan sebuah kompresor blower *vane* mengkompresi udara seperti yang ditunjukkan oleh gambar 9.6 (b).

Misal p_1 = tekanan masuk udara
 p_2 = tekanan keluar udara
 p_d = tekanan pada titik 3
 γ = indeks adiabatik udara
 v_1 = volume udara yang dikompresi

Kerja yang dilakukan karena kompresi (1-3):

$$W_1 = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_d}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad \dots \text{(I)}$$

dan kerja karena aliran balik (3-2):

$$W_2 = v_2 (p_2 - p_d) \quad \dots \text{(ii)}$$

∴ kerja total yang dilakukan

$$W = W_1 + W_2$$

∴ Efisiensi *blower vane* :

$$\eta = \frac{W_2}{W_1 + W_2}$$

Catatan: harga v_2 dan p_d pada persamaan (ii) dapat dicari dari persamaan:

$$v_2 = v_1 \times \left(\frac{p_1}{p_d} \right)^{1/\gamma}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor rotari jenis *vane* mengkompresi $4,5 \text{ m}^3$ udara per menit dari $1,0 \text{ kg/cm}^2$ hingga $2,0 \text{ kg/cm}^2$ jika berputar pada 450 rpm. Carilah daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor jika: (i) saluran masuk dan buang diletakkan sedemikian sehingga tidak terjadi kompresi internal, (ii) saluran masuk dan buang diletakkan sedemikian sehingga tekanan naik 50% karena kompresi sebelum terjadi aliran balik.

Jawab:

Diketahui: $v_1 = 4,5 \text{ m}^3/\text{min}$; $p_1 = 1,0 \text{ kg/cm}^2 = 1,0 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $p_2 = 2,0 \text{ kg/cm}^2 = 2,0 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; kecepatan = 450 rpm

(i) *Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor jika tidak ada kompresi internal*

Kerja tanpa kompresi internal:

$$W = v_1 (p_2 - p_1) = 4,5 (2,0 \times 10^4 - 1,0 \times 10^4)$$

$$= 45.000 \text{ kgm/min}$$

$$\therefore \text{Daya, } P = \frac{45.000}{4.500} = 10,0 \text{ hp}$$

(ii) *Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor jika 50% kenaikan tekanan karena kompresi.*

Karena terdapat 50% kenaikan tekanan karena kompresi, maka pelepasan udara sebelum aliran balik:

$$p_d = 1,0 + 0,5 (2,0 - 1,0)$$

$$= 1,5 \text{ kg/cm}^2 = 1,5 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$$

$$\therefore v_2 = v_1 \times \left(\frac{p}{p_d} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = 4,5 \left(\frac{1,0}{1,5} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 3,37$$

Kita tahu bahwa kerja teoritis pada proses kompresi udara dari 1,0 kg/cm² ke 1,5 kg/cm²:

$$W_1 = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_d}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1,4}{1,4 - 1} \times 1,0 \times 10^4 \times 4,5 \left[\left(\frac{1,5}{1,0} \right)^{\frac{1,4 - 1}{1,4}} - 1 \right]$$

$$= 19.350 \text{ kgm/min}$$

dan kerja yang dilakukan pada aliran balik:

$$W_2 = v_2 (p_2 - p_d) = 3,37 (2,0 \times 10^4 - 1,5 \times 10^4)$$

$$= 16.850 \text{ kgm/min}$$

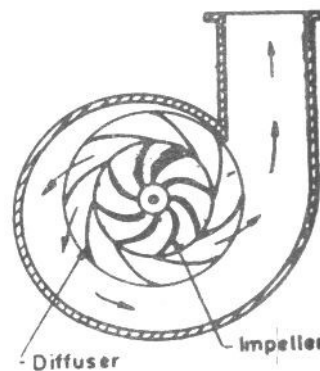
∴ Kerja total:

$$W = W_1 + W_2 = 19.350 + 16.850 = 36.200 \text{ kgm/min}$$

dan daya,
$$P = \frac{36.200}{4.500} = 8.04 \text{ hp}$$

Kompresor Sentrifugal

Kompresor blower sentrifugal adalah bentuk sederhana dari kompresor sentrifugal, dimana terdiri dari sebuah rotor (impeller) dengan sejumlah sudu (vane) lengkung terpasang secara simetris. Rotor berputar di dalam rumah siput kedap udara dengan saluran masuk dan keluar udara. *Casing* (rumah kompresor) di desain sehingga energi kinetik udara dirobah ke energi tekanan sebelum meninggalkan *casing* seperti ditunjukkan oleh gambar 9.7.



Gambar 9.7. Kompresor sentrifugal

Energi mekanik diberikan ke rotor dari sumber eksternal. Ketika rotor berputar, kompresor menghisap udara melalui matanya, meningkatkan tekanannya karena gaya sentrifugal dan mendorong udara mengalir melalui

difuser. Tekanan udara terus meningkat ketika melalui difuser. Akhirnya udara bertekanan tinggi di buang ke *receiver*. Udara masuk ke impeller secara radial dan meninggalkan impeller secara aksial.

Kerja Pada Kompresor Sentrifugal

Persamaan untuk kerja atau daya yang diperlukan bagi kompresor udara torak dapat digunakan untuk kerja dan daya pada kompresor rotari.

Kerja kompresor rotari:

$$W = p_1 v_1 \ln \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \quad \text{untuk kompresi isothermal}$$

$$= m RT_1 \ln r \quad \text{dimana } r = v_1 / v_2$$

$$= \frac{n}{(n-1)} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \text{untuk kompresi politropik}$$

$$= \frac{n}{(n-1)} \times RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad \text{karena } pv = mRT$$

$$= \frac{\gamma}{(\gamma-1)} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad \text{untuk kompresi adiabatik}$$

$$= m.C_p. (T_2 - T_1) \quad \text{dalam satuan kalor}$$

$$= mJ.C_p. (T_2 - T_1) \quad \text{dalam satuan kerja}$$

dimana: p_1 = tekanan awal udara

v_1 = volume awal udara

T_1 = temperatur awal udara

p_2, v_2, T_3 = variabel yang sama untuk keadaan akhir

m = massa udara yang dikompresi per menit

n = indeks politropik

γ = indeks adiabatik

C_p = kalor spesifik pada tekanan konstan

J = ekivalen kalor kalor

Contoh soal

Sebuah kompresor sentrifugal mengeluarkan 50 kg udara per menit pada tekanan 2 kg/cm² dan 97^o C. Tekanan dan temperatur udara masuk masing-masing adalah 1 kg/cm² dan 15^o C. Jika tidak ada kalor yang dilepaskan ke lingkungannya, carilah (a) indeks kompresi, (b) daya yang diperlukan, jika kompresi isothermal. Ambil harga $R = 29,3 \text{ kgm/kg}^0\text{K}$.

Jawab

Diketahui: $p_2 = 2 \text{ kg/cm}^2$; $m = 50 \text{ kg/cm}^2$; $T_2 = 97^0 \text{ C} = 97^0 + 273 = 370^0 \text{ K}$;
 $p_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$; $T_1 = 15^0 \text{ C} = 15^0 + 273 = 288^0 \text{ K}$; $R = 29,3 \text{ kgm/K}^0\text{K}$

(a) *Indeks kompresi*

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\frac{370}{288} = \left(\frac{2}{1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = (2)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$1,285 = (2)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\log 1,285 = \frac{n-1}{n} \times \log 2$$

$$0,1089 = \frac{n-1}{n} \times 0,3010$$

$$0,1089 n = 0,3010 n - 0,3010$$

$$0,1921 n = 0,3010$$

$$n = 1,57$$

(b) Daya yang diperlukan jika kompresi isothermal

Kerja kompresor:

$$\begin{aligned} W &= mRT \ln r \\ &= 50 \times 29,3 \times 288 \ln 2 \\ &= 292.100 \text{ kgm/min} \end{aligned}$$

∴ daya yang diperlukan:

$$P = \frac{292.100}{4.500} = 64,9 \text{ hp}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor udara sentrifugal mempunyai rasio kompresi tekanan 5 mengkompresi udara dengan laju 10 kg/s. Jika tekanan dan temperatur awal udara adalah 1 bar dan 20⁰ C, carilah (a) temperatur akhir gas, (b) daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor. Ambil harga $\gamma = 1,4$ dan $C_p = 1,0$ kJ/kg.K.

Jawab

Diketahui: Rasio kompresi tekanan:

$$\frac{p_2}{p_1} = 5$$

$m = 10$ kg/sec ; $p_1 = 1$ bar ; $T_1 = 20^0 \text{ C} = 20^0 + 273 = 293^0 \text{ K}$; $\gamma = 1,4$; $C_p = 1,0$ kJ/kgK

(a) Temperatur akhir gas

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_2}{293} = (5)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 1,584$$

$$\therefore T_2 = 293 \times 1,584 = 464^0 \text{ K} = 191^0 \text{ C}$$

(b) Daya yang diperlukan kompresor

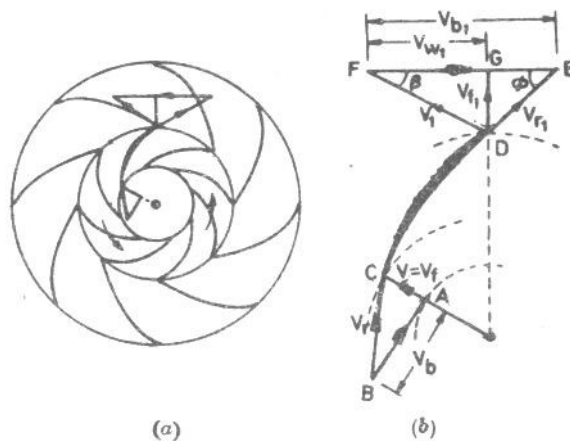
$$P = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

$$= 10 \times 1,0 (464 - 293) = 1.710 \text{ kW}$$

Segitiga Kecepatan Pada Sudu Bergerak Kompresor Sentrifugal

Seperti kita ketahui bahwa udara memasuki kompresor sentrifugal secara radial dan meninggalkan kompresor secara aksial. Lebih jauh, sudu dan difuser didesain sedemikian sehingga udara memasuki dan meninggalkan kompresor secara tangensial untuk mengurangi efek kejutan di sisi masuk dan keluar.

Misalkan udara memasuki sudu pada C dan keluar pada D seperti ditunjukkan oleh gambar 9.8 (a) dan (b).



Gambar 9.8. Segitiga kecepatan kompresor sentrifugal.

Kemudian kita gambar segitiga kecepatan pada sisi masuk dan keluar sudu seperti yang ditunjukkan oleh gambar 98 (a) dan (b).

Misalkan: V_b = kecepatan linier sudu bergerak pada sisi masuk (BA)

V = kecepatan absolut udara memasuki sudu (AC)

V_r = kecepatan relatif udara terhadap sudu bergerak pada sisi masuk (BC). Merupakan perbedaan vektor antara V_b dan V .

V_f = kecepatan aliran pada sisi masuk

θ = sudut antara kecepatan relatif (V_r) dengan arah gerak sudu

$V_{b1}, V_1, V_{r1}, V_{f1}, \phi =$ variabel yang bersesuaian untuk sisi keluar

Udara memasuki sudu sepanjang AC dengan kecepatan V . Karena udara memasuki sudu secara tegak lurus (secara radial) terhadap arah gerak sudu maka kecepatan aliran (V_f) sama dengan kecepatan udara (V). Selanjutnya, kecepatan pusar (*whirl*) pada sisi masuk menjadi nol. Kecepatan linier atau kecepatan rata-rata sudu (V_b) digambarkan oleh BA arah dan besarnya. Panjang BC mewakili kecepatan relatif (V_r) udara terhadap sudu. Udara mengalir di permukaan sudu dengan kecepatan relatif (V_{r1}) yang ditunjukkan oleh garis DE .

Kecepatan absolut udara (V_1) ketika meninggalkan sudu ditunjukkan oleh DF membentuk sudut β dengan arah gerak sudu. Komponen tangensial V_1 (diwakili oleh FG) disebut kecepatan pusar pada sisi keluar (V_{w1}). Komponen aksial V_1 (diwakili oleh DG) disebut kecepatan aliran sisi keluar (V_{f1}).

Misalkan $w =$ berat udara yang dikompresi oleh kompresor, kg/s

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

$F =$ massa aliran udara/sec \times perubahan kecepatan pusar

$$= \frac{w}{g} \times V_w + V_{w1} = \frac{w \cdot V_{w1}}{g} \quad \dots (\because V_w = 0)$$

dan kerja yang dilakukan pada arah gerak sudu:

$$\begin{aligned} W &= \text{gaya} \times \text{jarak} \\ &= \frac{w \cdot V_{w1}}{g} \times V_{b1} \quad \text{kgm/sec} \end{aligned}$$

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor dapat dicari seperti biasanya, dengan persamaan:

$$\begin{aligned} P &= \frac{\text{kerja yang dilakukan dalam kgm/sec}}{75} \\ &= \frac{w \cdot V_{w1} \times V_{b1}}{g \times 75} \quad \text{hp} \end{aligned}$$

Catatan :

1. Dalam satuan SI, rumus untuk daya adalah:

$$P = w \cdot V_{w1} \times V_{b1} \quad \text{Watt}$$

2. Kecepatan sudu pada sisi masuk dan sisi keluar dapat diperoleh dengan rumus:

$$V_b = \frac{\pi DN}{60} \quad \text{dan} \quad V_{b1} = \frac{\pi D_1 N}{60}$$

dimana D dan D_1 adalah diameter dalam dan diameter luar impeller.

3. Pada kondisi ideal (dengan kata lain untuk kerja maksimum) $V_{w1} = V_{b1}$, maka kerja ideal:

$$= \frac{w}{g} \times V_{w1}^2 = \frac{w}{g} \times V_{b1}^2 \quad \text{kgm/sec}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor sentrifugal berjalan pada kecepatan 2000 rpm dan menerima udara pada 17°C . Jika diameter luar ujung sudu adalah 75 cm, carilah temperatur udara meninggalkan kompresor. Ambil harga $C_p = 0,24$.

Jawab

Diketahui: $N = 2000 \text{ rpm}$; $T_1 = 17^\circ \text{C} = 17^\circ + 273 = 290^\circ \text{K}$; $D_1 = 75 \text{ cm} = 0,75 \text{ m}$; $C_p = 0,24$

Temperatur udara meninggalkan kompresor

Kecepatan tangensial pada ujung sudu:

$$V_b = \frac{\pi D_1 N}{60} = \frac{\pi \times 0,75 \times 2000}{60} = 78,5 \quad \text{m/s}$$

\therefore kerja per kg udara:

$$W = \frac{1}{g} \times V_{b1}^2 = \frac{1}{9,81} \times 78,5^2 = 628,2 \quad \text{kgm/s}$$

$$= \frac{628,2}{427} = 1,47 \quad \text{kcal/s}$$

Dengan menggunakan persamaan:

$$W = m \cdot C_p (T_2 - T_1)$$

$$1,47 = 1 \times 0,24 (T_2 - 290) = 0,24 T_2 - 69,6$$

$$T_2 = 296,1^0 \text{ K} = 23,1^0 \text{ C}$$

Lebar Sudu

Lebar sudu impeller pada sisi masuk dan keluar kompresor udara rotari diperoleh dari keadaan dimana massa udara yang mengalir melalui sudu pada sisi masuk dan keluar adalah sama.

Misalkan: b = lebar sudu impeller pada sisi masuk

D = diameter impeller pada sisi masuk

V_f = kecepatan aliran pada sisi masuk

v_s = volume spesifik udara pada sisi masuk

b_1, D_1, V_{f1}, v_{s1} = variabel yang sama untuk sisi keluar

m = massa udara yang mengalir melalui impeller

Massa udara yang mengalir melalui impeller pada sisi masuk:

$$m = \frac{\pi D b V_f}{v_s} \quad \dots \text{ (i)}$$

Dengan cara yang sama, massa udara yang mengalir di sisi keluar:

$$m = \frac{\pi D_1 b_1 V_{f1}}{v_{s1}} \quad \dots \text{ (ii)}$$

Karena massa udara yang mengalir melalui impeller adalah konstan, maka:

$$\frac{\pi D b V_f}{v_s} = \frac{\pi D_1 b_1 V_{f1}}{v_{s1}} \quad \dots \text{ (iii)}$$

Catatan: Kadang-kadang jumlah dan ketebalan sudu juga diperhitungkan. Dalam hal ini, massa udara yang mengalir melalui impeller pada sisi masuk:

$$m = \frac{(\pi D - n b) V_f}{v_s}$$

dimana n adalah jumlah sudu.

Contoh soal

Sebuah kompresor udara sentrifugal mempunyai diameter dalam dan luar masing-masing 25 cm dan 50 cm, mengkompresi 30 kg udara per menit pada 4000 rpm. Sudut vane pada sisi masuk dan keluar masing-masing adalah 30° dan 40° . Carilah ketebalan sudu, jika impeller mempunyai 40 sudu. Ambil harga volume spesifik udara $0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$.

Jawab

Diketahui: $D = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$; $D_1 = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$; $m = 30 \text{ kg/min} = 0,5 \text{ kg/s}$; $N = 4000 \text{ rpm}$; $\theta = 30^\circ$; $\phi = 40^\circ$; $n = 40$; $v_s = 0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$

Kecepatan impeller pada sisi keluar:

$$V_b = \frac{\pi D N}{60} = \frac{\pi \times 0,25 \times 4000}{60} = 52,4 \text{ m/s}$$

Kecepatan pada sisi masuk:

$$V_f = V_b \tan 30^\circ = 52,4 \times 0,577 = 30,2 \text{ m/s}$$

Maka:

$$m = \frac{(\pi D - nb)V_f}{v_s}$$

$$0,5 = \frac{(\pi \times 0,25 - 40b) \times 30,2}{0,8}$$

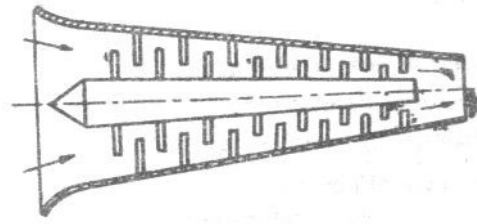
$$0,0132 = \pi \times 0,25 - 40b$$

$$40b = 0,7854 - 0,0132 = 0,7722$$

$$b = 0,019 \text{ m} = 1,9 \text{ cm}$$

Kompresor Aliran Aksial

Dalam bentuk yang sederhana, kompresor aliran aksial terdiri dari sejumlah baris sudu putar yang terpasang pada *drum* yang berputar. *Drum* berputar di dalam *casing* yang kedap udara dimana terdapat barisan sudu diam, seperti ditunjukkan oleh gambar 9.9.



Gambar 9.9. Kompresor aliran aksial.

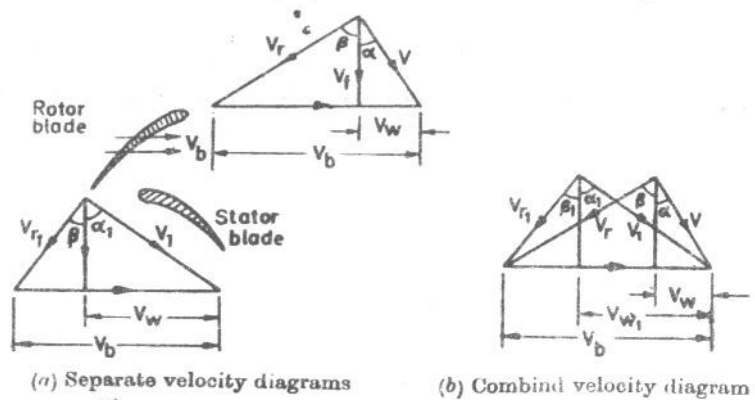
Energi mekanik diberikan oleh poros yang berputar yang memutar *drum*. Udara masuk dari sisi kompresor. Ketika *drum* berputar, udara mengalir diantara stator dan rotor. Ketika udara mengalir dari satu pasangan stator dan rotor, udara mengalami kompresi, dan begitu seterusnya. Udara dlepaskan di bagian katup keluar dalam keadaan tekanan tinggi.

Perbedaan Antara Kompresor Udara Sentrifugal dengan Aliran Aksial

Berikut diberikan perbedaan-perbedaan utama antara kompresor sentrifugal dengan kompresor aliran aksial.

No.	<i>Kompresor Sentrifugal</i>	<i>Kompresor Aliran Aksial</i>
1.	Aliran udara tegak lurus terhadap sumbu kompresor	Aliran udara paralel dengan sumbu kompresor.
2.	Mempunyai biaya pembuatan dan operasi yang rendah	Mempunyai biaya pembuatan dan operasi yang tinggi.
3.	Memerlukan torsi awal yang rendah.	Memerlukan torsi yang besar untuk start.
4.	Tidak sesuai untuk banyak tingkat.	Cocok untuk banyak tingkat.
5.	Memerlukan Luas penampang yang besar untuk laju aliran besar.	Memerlukan luas penampang yang kecil untuk laju aliran yang besar. Cocok untuk penggunaan dipesawat udara.

Diagram Kecepatan untuk Kompresor Udara Aliran Aksial



Gambar 9.10. Diagram kecepatan untuk kompresor aliran aksial.

Pada kompresor aksial, *drum* dengan sudu rotor berputar di dalam *casing* yang mempunyai sudu stator yang tetap. Segitiga kecepatan sisi masuk dan sisi keluar untuk sudu rotor ditunjukkan oleh gambar 9.10 (a) dan (b). Hubungan antara segitiga kecepatan sisi masuk dan keluar adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan sudu (V_b) untuk kedua segitiga adalah sama.
2. Kecepatan Aliran (V_f) untuk kedua segitiga adalah sama.
3. Kecepatan relatif pada segitiga sisi keluar (V_{r1}) lebih kecil dari kecepatan relatif pada sisi masuk (V_r) disebabkan oleh gesekan.

Catatan: 1. Kerja kompresor per kg udara:

$$W = \frac{V_b(V_{w1} - V_w)}{g} \quad \dots \text{ (dalam satuan kerja)}$$

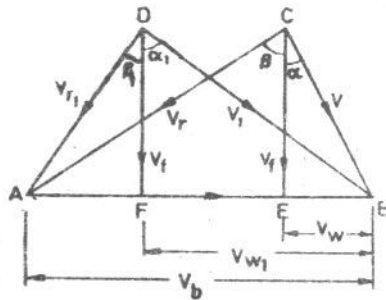
$$= \frac{V_b(V_{w1} - V_w)}{g \cdot J} \quad \dots \text{ (dalam satuan kalor)}$$

2. Kadang-kadang faktor kerja atau faktor kerja input juga diberikan. Dalam hal ini, kerja kompresor per kg udara adalah (dalam satuan kerja)

$$= \frac{V_b(V_{w1} - V_w)}{g} \times \text{faktor kerja}$$

Derajat Reaksi

Merupakan istilah penting dalam pembahasan kompresor aliran aksial. Derajat Reaksi didefinisikan sebagai rasio kenaikan tekanan pada sudu rotor terhadap kenaikan tekanan pada kompresor satu tingkat.



Gambar 9.11. Diagram segitiga kecepatan dengan derajat reaksi 50%.

Derajat reaksi biasanya dijaga pada angka 50% atau 0,5 untuk semua jenis kompresor aliran aksial. Secara matematik, derajat reaksi dirumuskan:

$$R = \frac{\text{Kenaikan tekanan pada sudu rotor}}{\text{Kenaikan tekanan pada kompresor}}$$

$$= \frac{\frac{V_r^2 - V_{r1}^2}{2g}}{\frac{V_b(V_{w1} - V_w)}{g}} = \frac{V_r^2 - V_{r1}^2}{2V_b(V_{w1} - V_w)}$$

Dari segitiga kecepatan diperoleh:

$$R = \frac{V_f(\tan \beta + \tan \beta_1)}{2V_b}$$

Untuk derajat reaksi 50%:

$$\frac{V_b}{V_f} = \tan \beta + \tan \beta_1$$

Dari geometri segitiga kecepatan:

$$\begin{aligned}\frac{V_b}{V_f} &= \tan \alpha + \tan \alpha_1 = \tan \alpha + \tan \beta \\ &= \tan \alpha_1 + \tan \beta_1\end{aligned}$$

$$\therefore \angle \beta = \angle \alpha_1 \text{ dan } \angle \beta_1 = \angle \alpha$$

Contoh soal

Sebuah kompresor aliran aksial, dengan rasio kompresi 5, menghisap udara pada 20° C dan melepaskannya pada 50° C . Diasumsikan 50% derajat reaksi, kecepatan sudu 50%, carilah kecepatan aliran jika kecepatan sudu adalah 100 m/s. Cari juga jumlah tingkat. Ambil faktor kerja = 0,85, $\alpha = 10^\circ$; $\beta = 40^\circ$ dan $C_p = 0,24$.

Jawab

Diketahui: $p_2/p_1 = 5$; $T_1 = 20^\circ \text{ C} = 20^\circ + 273 = 293^\circ \text{ K}$; $T_2 = 50^\circ \text{ C} = 50^\circ + 273 = 323^\circ \text{ K}$; $R = 50\%$; $V_b = 100 \text{ m/s}$; faktor kerja = 0,85; $\alpha = 10^\circ$; $\beta = 40^\circ$; $C_p = 0,24$.

Kecepatan Aliran

Dari geometri segitiga kecepatan:

$$\frac{V_b}{V_f} = \tan \alpha + \tan \beta = \tan 10^\circ + \tan 40^\circ$$

$$\frac{100}{V_f} = 0,1763 + 0,8391 = 1,0154$$

$$V_f = 98,5 \text{ m/s}$$

Jumlah Tingkat

Kerja yang diperlukan per kg udara:

$$= C_p (T_2 - T_1) = 0,24 (323 - 293)$$

$$= 7,2 \text{ kcal}$$

Dari geometri segitiga kecepatan,

$$V_w = V_f \tan \alpha = 98,5 \times \tan 10^\circ$$

$$= 98,5 \times 0,1763 = 17,4 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \text{dan } V_{w1} &= V_f \tan \alpha_1 = 98,5 \times \tan 40^\circ && \dots \text{ (dengan derajat reaksi} \\ & && \text{50\%, } \angle \alpha_1 = \angle \beta \text{)} \\ &= 98,5 \times 0,8391 = 82,7 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Kerja per kg udara per tingkat:

$$\begin{aligned} W &= \frac{V_b (V_{w1} - V_w)}{g \cdot j} \times \text{faktor kerja} \\ &= \frac{100 (82,7 - 17,4)}{9,81 \times 427} \times 0,85 = 1,3 \text{ kcal} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{ Jumlah tingkat : } = \frac{7,2}{1,3} = 5,6 \approx 6$$

C. UNJUK KERJA KOMPRESOR

Efisiensi suatu mesin secara umum adalah rasio kerja yang dilakukan dengan energi yang dibrikan. Kriteria efisiensi termodinamik kompresor torak adalah isothermal dan kompresor sentrifugal adalah isentropik. Berikut ini akan dibicarakan efisiensi untuk kedua jenis kompresor ini.

Efisiensi Kompresor Torak

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa kriteria efisiensi termodinamik kompresor torak adalah isothermal. Namun secara umum, efisiensi-efisiensi berikut perlu untuk diketahui.

1. Efisiensi Isothermal (atau efisiensi kompresor)

Adalah rasio kerja (atau daya) yang diperlukan untuk mengkompresi udara secara isothermal terhadap kerja sebenarnya yang diperlukan. Secara matematik dirumuskan:

$$\begin{aligned} \eta_c &= \frac{\text{daya kuda isothermal}}{\text{daya kuda indikated}} \\ &= \frac{\text{kerja isothermal}}{\text{kerja indikated}} \end{aligned}$$

2. Efisiensi Isotermal Keseluruhan

Adalah rasio daya kuda isotermal terhadap daya kuda poros atau daya kuda *brake* (brake horse power) dari motor atau mesin yang diperlukan oleh kompresor. Secara matematik dirumuskan:

$$= \frac{\text{daya kuda isotermal}}{\text{daya kuda poros atau BHP motor}}$$

BHP = Brake Horse Power (Daya Kuda *Brake*)

3. Efisiensi Mekanik

Adalah rasio daya kuda indikated terhadap daya kuda poros atau daya kuda *brake* mesin penggerak. Secara matematik dirumuskan:

$$\eta_m = \frac{\text{daya kuda indikated}}{\text{daya kuda poros atau BHP motor}}$$

4. Efisiensi Adiabatik

Adalah rasio daya kuda adiabatik terhadap daya kuda untuk menggerakkan kompresor. Secara matematik dirumuskan:

$$\eta_a = \frac{\text{daya kuda adiabatik}}{\text{BHP untuk menggerakkan kompresor}}$$

5. Efisiensi Volumetrik

Adalah rasio volume udara bebas yang dilepaskan per langkah terhadap volume sapuan piston. Efisiensi volumetrik pada kompresor torak berbeda antara kompresor dengan *clearance* dan tanpa *clearance*.

Catatan: Karena sulit untuk memvisualisasikan kondisi NTP. udara sapuan, kondisi yang banyak digunakan adalah mendefinisikan efisiensi volumetrik sebagai rasio volume udara sebenarnya yang dihisap oleh kompresor terhadap volume sapuan piston.

Contoh soal

Sebuah kompresor resiprokal (torak) menghisap udara sebanyak 6 kg/min pada 25^o C. Kompresor mengkompresi udara secara politropik membuang udara pada 105^o C. Carilah daya kuda udara. Jika daya kuda poros 18, carilah efisiensi mekanik. Diasumsikan $R = 29,3 \text{ kgm/kg}^0\text{K}$ dan $n = 1,3$.

Jawab

Diketahui: $m = 6 \text{ kg}$; $T_1 = 25^\circ \text{ C} = 298^\circ \text{ K}$; $T_2 = 105^\circ \text{ C} = 378^\circ \text{ K}$; daya kuda poros = 18 hp ; $R = 29,3 \text{ kgm/kg}^\circ\text{K}$; $n = 1,3$.

Daya kuda udara

$W =$ kerja kompresor

$$\begin{aligned} W &= \frac{n}{n-1} mR(T_2 - T_1) \\ &= \frac{1,3}{1,3-1} \times 6 \times 29,3 (378 - 298) \\ &= 60.940 \text{ kg-m/min} \end{aligned}$$

\therefore daya kuda udara:

$$= \frac{60.940}{4.500} = 13,54 \text{ hp}$$

Efisiensi mekanik

Efisiensi mekanik:

$$\begin{aligned} \eta_m &= \frac{\text{daya kuda udara}}{\text{daya kuda poros}} = \frac{13,54}{18,0} \\ &= 0,752 = 75,2 \% \end{aligned}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor menghisap $42,5 \text{ m}^3$ udara per menit ke dalam silinder pada tekanan $1,05 \text{ kg/cm}^2$ abs. Udara dikompresi secara politropik ($pv^{1,3} = C$) hingga tekanan $4,2 \text{ kg/cm}^2$ abs sebelum dilepaskan ke penampung. Diasumsikan efisiensi mekanik adalah 80%, carilah:

1. Daya kuda indikated.
2. Daya kuda poros.
3. Efisiensi isothermal keseluruhan.

Jawab

Diketahui: $v_1 = 42,5 \text{ m}^3/\text{min}$; $p_1 = 1,05 \text{ kg/cm}^2 = 1,05 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $n = 1,3$; $p_2 = 4,2 \text{ kg/cm}^2 = 4,2 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$; $\eta_m = 80\% = 0,8$

1. *Daya kuda indikated*

W = kerja indikated kompresor

$$\begin{aligned} W &= \frac{n}{n-1} \times p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\ &= \frac{1,3}{1,3-1} \times 1,05 \times 10^4 \times 42,5 \left[\left(\frac{4,2}{1,05} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} - 1 \right] \\ &= 1,934 \times 10^3 (1,377 - 1) \\ &= 729,1 \times 10^3 \text{ kg-m/min} \end{aligned}$$

\therefore Daya kuda indikated, IHP :

$$IHP = \frac{729,1 \times 10^3}{4500} = 162,0 \text{ hp}$$

2. *Daya kuda poros*

Daya kuda poros:

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{daya kuda indikated}}{\text{efisiensi mekanik}} \\ &= \frac{162,0}{0,8} = 202,5 \text{ hp} \end{aligned}$$

3. *Efisiensi isothermal keseluruhan*

Kerja isothermal/min:

$$\begin{aligned} W &= p_1 v_1 \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \\ &= 1,05 \times 10^4 \times 42,5 \ln \left(\frac{4,2}{1,05} \right) \\ &= 617,8 \times 10^3 \text{ kgm/min} \end{aligned}$$

∴ daya kuda isothermal:

$$= \frac{617,8 \times 10^3}{4.500} = 137,3 \text{ hp}$$

Efisiensi isothermal keseluruhan:

$$\eta_o = \frac{\text{daya kuda isothermal}}{\text{daya kuda poros}} = \frac{137,3}{202,5}$$

$$= 0,678 = 67,8\%$$

Efisiensi Volumetrik Kompresor Torak dengan Clearance

Misalkan sebuah kompresor torak aksi tunggal dengan volume clearance, seperti gambar 9.2.

Bila, p_1 = tekanan awal udara (sebelum kompresi)

v_1 = volume awal udara (sebelum kompresi)

T_1 = temperatur awal udara (sebelum kompresi)

p_2, v_2, T_2 = tekanan, volume, dan temperatur untuk kondisi akhir (yaitu pada titik keluar)

p_a, v_a, T_a = tekanan, volume, dan temperatur untuk kondisi ambien (yaitu N, T, P)

v_c = volume clearance

n = indeks politropik

Pada proses ekspansi politropik 3-4:

$$p_2 \cdot v_c^n = p_1 \cdot v_4^n$$

$$\therefore v_4 = v_c \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

dan rasio clearance:

$$K = \frac{v_c}{v_s} = \frac{v_c}{v_1 - v_c}$$

∴ efisiensi volumetrik :

$$\begin{aligned}\eta_v &= \frac{(v_1 - v_4)}{v_s} = \frac{(v_s + v_c) - v_4}{v_s} \\ &= \frac{v_s + v_c - v_c \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}}{v_s} \quad \dots \quad \left[v_4 = v_c \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} \right] \\ &= 1 + k - k \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \dots \quad \left(\frac{v_c}{v_s} = k\right) \\ &= 1 + k - k \left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad \dots \quad \left[\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right]\end{aligned}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor torak satu tingkat aksi tunggal dengan 5% volume clearance mengkompresi udara dari 1 bar hingga 5 bar. Carilah perubahan efisiensi volumetrik kompresor, jika eksponen proses ekspansi berubah dari 1,25 ke 1,4.

Jawab:

Diketahui: $v_c = 5\%$ dari volume awal $= 0,05 v_1$; $p_1 = 1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2$;
 $p_2 = 5 \text{ bar} = 5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

rasio clearance:

$$K = \frac{v_c}{v_1 - v_c} = \frac{0,05 v_1}{v_1 - 0,05 v_1} = \frac{0,05}{0,95} = 0,053$$

Efisiensi volumetrik:

$$\eta_v = 1 + k - k \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\text{Untuk } n = 1,25 \quad = 1 + 0,053 - 0,053 \left(\frac{5}{1} \right)^{\frac{1}{1,25}} = 0,861$$

$$\text{Untuk } n = 1,4 \quad = 1 + 0,053 - 0,053 \left(\frac{5}{1} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,886$$

∴ perubahan efisiensi volumetrik:

$$= 0,886 - 0,861 = 0,025 = 2,5\%$$

Efisiensi Kompresor Sentrifugal

1. Efisiensi Isentropik (atau efisiensi kompresor)

Adalah rasio kerja (atau daya) yang dibutuhkan untuk mengkompresi udara secara isentropik terhadap kerja aktual yang dibutuhkan untuk mengkompresi udara untuk rasio tekanan yang sama.

Secara matematik, dirumuskan:

$$\eta_i = \frac{h_2' - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}$$

dimana, h_2' = enthalpi udara pada sisi keluar untuk kompresi isentropik.

h_2 = enthalpi udara pada sisi keluar untuk kompresi aktual.

h_1' = enthalpi udara pada sisi masuk.

T_2' , T_2 , T_1 = temperatur pada titik yang bersesuaian.

2. Efisiensi Politropik

Adalah rasio kerja (atau daya) yang dibutuhkan untuk mengkompresi udara secara politropik terhadap kerja aktual yang dibutuhkan untuk mengkompresi udara untuk rasio tekanan yang sama.

Secara matematik, dirumuskan:

$$\eta_p = \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \times \left(\frac{n}{n - 1} \right)$$

dimana, γ = rasio kalor spesifik

n = indeks politropik

Contoh soal

Pompa sentrifugal dengan efisiensi isentropik 70% melepaskan 20 kg udara per menit pada tekanan 3 bar. Jika kompresor menerima udara pada 20⁰ C dan tekanan 1 bar, carilah temperatur aktual udara pada sisi keluar. Cari juga daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor, jika efisiensi mekanik 95%. Ambil γ dan C_p masing-masingnya adalah 1,4 dan 1,0.

Jawab

Diketahui: $\eta_i = 70\% = 0,7$; $m = 20$ kg/min ; $p_2 = 3$ bar ; $T_1 = 20^0$ C = 293⁰ K ; $p_1 = 1$ bar ; $\eta_m = 95\% = 0,95$

Temperatur aktual udara pada sisi keluar

dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{T_2'}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

dimana T_2' = temperatur udara pada sisi keluar untuk kompresi isentropik.

$$\frac{T_2'}{293} = \left(\frac{3}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 1,369$$

$$T_2' = 293 \times 1,369 = 401,1^0 \text{ K}$$

dengan menggunakan persamaan:

$$\eta_i = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$0,7 = \frac{401,1 - 293}{T_2 - 293}$$

$$0,7 T_2 - 205,1 = 401,1 - 293 = 108,1$$

$$T_2 = 447,4^0 \text{ K} = 174,1^0 \text{ C}$$

Daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor

Kerja yang dilakukan untuk mengkompresi udara secara isentropik:

$$\begin{aligned} W &= m \cdot C_p (T_2 - T_1) \\ &= 20 \times 1,0 (447,4 - 293) = 3.088 \text{ kJ/min} \\ &= 51,47 \text{ kJ/sec} = 51,47 \text{ kNm/sec} \end{aligned}$$

∴ daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor:

$$= \frac{51,47}{0,95} = 54,2 \text{ kW}$$

Contoh soal

Sebuah kompresor sentrifugal mempunyai rasio kompresi 2,4 mengkompresi udara secara politropik sesuai dengan persamaan $pv^{1,6} = \text{konstant}$. Carilah efisiensi politropik kompresor, jika $C_p = 0,237$ dan $C_v = 0,169$.

Jawab

Diketahui: $p_2/p_1 = 2,4$; $n = 1,6$; $C_p = 0,237$; $C_v = 0,169$

$$\begin{aligned} \therefore \eta &= \left(\frac{y-1}{y} \right) \times \left(\frac{n}{n-1} \right) \\ &= \frac{1,4-1}{1,4} \times \frac{1,6}{1,6-1} \\ &= 0,762 = 76,2\% \end{aligned}$$

Faktor Slip

Seperti telah dibicarakan sebelumnya bahwa kerja ideal atau maksimum oleh kompresor sentrifugal:

$$= \frac{w}{g} \times V_{wl}^2 = \frac{w}{g} \times V_b^2$$

Persamaan di atas diturunkan dengan asumsi bahwa $V_{w1} = V_b$. Tetapi dalam kondisi nyata, V_{w1} selalu lebih kecil dari V_b . Perbedaan antara V_b dan V_{w1} (yaitu: $V_b - V_{w1}$) disebut dengan *slip*. Dan rasio V_{w1} terhadap V_b (yaitu: V_{w1} / V_b) disebut dengan *faktor slip*.

Perbandingan Antara Sudu Turbin Dengan Sudu Kompresor Sentrifugal

Berikut ini perbedaan utama antara sudu turbin dengan kompresor.

No.	Sudu Turbin	Sudu Kompresor Sentrifugal
1.	Jalur antara sudu konvergen	Jalur antara sudu divergen
2.	Karena jalur konvergen, aliran dipercepat, tetapi tekanan menurun.	Karena jalur divergen, aliran menyebar atau mengalami perlambatan, tetapi tekanan naik.
3.	Aliran lebih stabil	Aliran kurang stabil.
4.	Aliran selalu terjadi dalam satu arah.	Kadang-kadang aliran memecah dan berbalik arah.
5.	Sudu sederhana dalam desain dan konstruksi, karena profilnya terdiri dari busur melingkar dan garis lurus.	Sudu rumit dalam desain dan konstruksi karena profilnya terdiri dari penampang sudu pesawat berdasarkan teori aerodinamik.

Soal-soal

1. Terangkan mengenai kerja kompresor udara torak satu tingkat.
2. Terangkan pengaruh volume clearance pada kompresor torak.
3. Apa yang dimaksud dengan kompresi tingkat jamak, sebutkan keuntungan-keuntungannya.
4. Kompresor udara satu tingkat dengan *bore* 300 mm dan langkah 400 mm mengkompresi udara dari tekanan 1 kg/cm² ke 5 kg/cm². Carilah daya yang diperlukan kompresor, jika kompresor beroperasi pada 200 rpm, apabila kompresi udara (i) isothermal, (2) adiabatik dengan indeks 1,4, (3) mengikuti persamaan $pv^{1,25} = C$.

Petunjuk: volume kompresor per menit:

$$= \pi/4 \times 0,3^2 \times 0,4 \times 200 = 5,65 \text{ m}^3/\text{min}$$

(jawab: 20,2 hp; 25,7 hp; 23,9 hp)

5. Kompresor udara satu tingkat melepaskan udara 15 kg/min setelah mengkompresi sesuai persamaan $pv^{1,32} = C$. Carilah daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor, jika udara dihisap pada 27^o C dan rasio tekanan 20/3.

(jawab: 5.290 kg-m/s)

6. Sebuah kompresor udara menerima 9 kg udara per menit pada 15^o C dan 1 kg/cm² dan melepaskannya pada tekanan 6 kg/cm². Diasumsikan kompresi mengikuti persamaan $pv^{1,25} = C$, carilah daya yang diperlukan untuk menggerakkan kompresor. Ambil efisiensi mekanik kompresor sebesar 80%. Abaikan *clearance*.

(jawab: 45,3 hp)

7. Perkirakanlah dayakuda kompresor udara dua tingkat untuk mengkompresi 280 m³ per jam udara pada 1 kg/cm² abs dan 10^o C ke tekanan akhir 34 kg/cm² abs. Penampung (*receiver*) antara mendinginkan udara ke 30^o C dan 6 kg/cm² abs. Diasumsikan efisiensi mekanik 85% dan indek kompresi 1,4.

(jawab: 50,13 hp)

DAFTAR PUSTAKA

1. Culp AC., *Prinsip Konversi Energi*. Erlangga, 1996
2. Khurmi, RS., *A Text Book of Hydraulics, Fluid Mechanics and Hydraulics Machines*. S. Chan & Company Ltd. 2002.
3. Khurmi RS., *A Text Book of Mechanical Technology*, S. Chan & Company Ltd. 2002.
4. Suryawan, Bambang. *Diktat Kuliah Pompa Dan Kompresor, Teori dan Penyelesaian*. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.