

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sifat-sifat Fisik Udara

2.1.1 Susunan Udara

Bumi ini merupakan sebuah planet yang diselubungi suatu lapisan yang terdiri dari berbagai gas sampai setinggi kurang lebih 10 km di atas permukaan laut. Selubung ini disebut atmosfer, dan yang umumnya disebut udara adalah atmosfer di dekat permukaan bumi. Karena udara merupakan gas yang paling penting di antara yang lain, maka di sini akan diberikan beberapa sifatnya yang penting.

Seperti diketahui, udara terdiri dari beberapa campuran gas dengan susunannya seperti diberikan dalam tabel 2.1. Secara kasar dapat dikatakan bahwa udara terdiri dari 1 bagian volume oksigen (O_2) dan 4 bagian volume nitrogen (N_2) yang tercampur secara seragam. Gas-gas yang lain terdapat dalam jumlah sangat sedikit. Selain itu terdapat juga uap air di dalam atmosfer.

Tabel 2.1 Daftar Komposisi Udara⁽⁶⁾

Komposisi Udara	Nitrogen (N_2)	Oksigen (O_2)	Argon (Ar)	Karbon dioksida (CO_2)	Uap Air, Debu, Minyak, dll
Perbandingan Volume (%)	79,09	20,95	0,93	0,03	sedikit
Perbandingan Berat (%)	75,53	23,14	1,28	0,05	sedikit

2.1.2 Berat Jenis Udara

Berat jenis gas (termasuk udara) dapat bervariasi tergantung pada tekanan dan temperaturnya. Karena itu untuk menyatakan berat jenis suatu gas harus disebutkan pula tekanan dan temperaturnya. Berdasarkan kutipan yang penulis ambil bahwa dalam prakteknya ada dua macam kondisi seperti dibawah ini.

1. Kondisi standar industri⁽⁶⁾

Udara dengan kondisi ini mempunyai keadaan sebagai berikut:

Temperatur : 20°C (293°K)

Tekanan mutlak : 760 mmHg (0,1013MPa)

Kelembaban Relative: 65%

Berat Jenis: 1,204 kgf/m³ (11,807 N/m³)

Kondisi industri ini sering dipakai untuk menyatakan kondisi isap pada kompresor.

2. Kondisi normal teoritis⁽⁶⁾

Udara dengan kondisi ini mempunyai keadaan sebagai berikut:

Temperatur: 0°C (273°K)

Tekanan Mutlak: 760 mmHg (0,1013 MPa)

Berat Jenis: 1,293 kgf/m³ (12,68 N/m³)

2.1.3 Panas jenis udara

Jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan temperature 1 kg suatu zat sebesar 1°C disebut panas jenis. Adapun jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan suatu benda atau zat secara menyeluruh sebesar 1°C disebut kapasitas termal benda atau zat tersebut.

Satuan jumlah panas yang dipakai adalah kilo kalori (disingkat kcal), dimana 1 kilo kalori sama dengan jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan temperature 1 kg air sebesar 1°C , maka satuan panas jenis menjadi $\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ dalam system SI, sebagai satuan panas dipakai kilo joule (disingkat kJ) dimana $1 \text{ kJ} = 0,2389 \text{ kcal}$ atau $1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ}$.

Panas jenis tergantung pada macam bahan seperti diuraikan dibawah ini :

1. Panas jenis gas

Panas jenis suatu gas juga didefinisikan sebagai jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur 1 gram gas tersebut sebesar 1°C , seperti pada zat-zat yang lain. Namun untuk gas ada dua macam panas jenis, yaitu: panas jenis pada tekanan tetap dan panas jenis pada temperatur tetap.

a) Panas jenis pada tekanan tetap.

Jika suatu gas dipanaskan atau didinginkan pada tekanan tetap, maka volumenya akan membesar atau mengecil lebih banyak dari pada zat cair atau zat padat. 1 kg gas yang ditempatkan dalam silinder dengan torak yang dapat bergerak tanpa gesekan. Jika silinder dipanaskan maka gas akan mengembang mendorong torak ke atas sehingga tekanan di dalam silinder tidak berubah. Dalam hal demikian jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur 1 kg gas tersebut sebesar 1°C disebut panas jenis pada tekanan tetap. Panas jenis ini biasanya diberi lambang C_p , dimana untuk udara $C_p = 0,24 \text{ kcal}/(\text{kg}^{\circ}\text{C}) = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$

b) Panas jenis pada volume tetap

Jika 1 kg gas ditempatkan di dalam sebuah bejana tertutup lalu dipanaskan tanpa dapat berkembang maka tekanan dan temperaturnya akan naik. Jumlah

panas yang diperlukan untuk menaikkan temperatur 1 kg gas ini sebesar 1°C dalam keadaan demikian disebut panas jenis pada volume tetap. Panas jenis ini biasanya diberi lambang C_v , dimana untuk udara $C_v = 0,17 \text{ kcal}/(\text{kg}^\circ\text{C}) = 0,712 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$

c) Rasio panas jenis

Jika kedua panas jenis tersebut diatas diperbandingkan terlihat bahwa panas jenis pada tekanan tetap harganya lebih besar daripada panas jenis volume tetap. Hal ini terjadi karena, selain dipakai untuk menaikkan temperatur, sebagian panas yang diberikan dalam pemanasan pada tekanan tetap dipakai juga untuk melakukan kerja pada waktu gas mengembang.

Perbandingan antara panas jenis pada tekanan tetap dan panas jenis pada volume tetap. Biasa disebut rasio panas jenis yang diberi lambing k. jadi $k = C_p/C_v$, dimana untuk udara kering $k=1,401$. Rasio ini mempunyai peranan penting dalam perhitungan kompresi gas.

Tabel 2.2 Nilai k, Cp, dan Cv untuk macam gas ⁽⁷⁾

Rumus Molekul	Nama Gas	Jumlah Atom	Panas Jenis pada Tekanan tetap	Panas Jenis pada Volume Tetap	Perbandingan Panas Jenis
Ar	Argon	1	0,1233	0,0746	1,667
He	Helium	1	1,2425	0,746	1,666
-	Udara	2	0,24	0,17	1,401
H ₂	Hidrogen	2	3,402	2,402	1,408
N ₂	Nitrogen	2	0,2350	0,175	1,41
O ₂	Oksigen	2	0,2419	0,173	1,40
H ₂ O	Uap air	3	0,4765	0,340	1,305
CO ₂	Karbon dioksida	3	0,211	0,163	1,30
C ₂ H ₂	Asetilen	4	0,402	0,323	1,24
C ₂ H ₅ OH	Alkohol	9	0,435	0,400	1,13

2.1.4 Tekanan Udara

1. Tekanan Gas

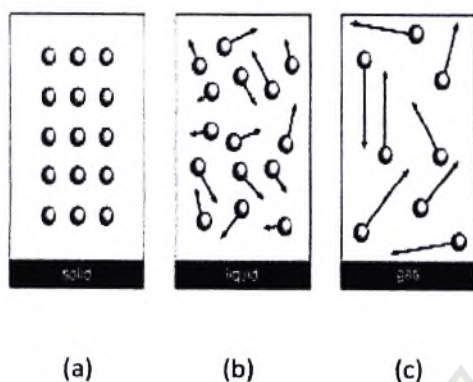
Jika suatu gas atau udara menempati suatu bejana tertutup maka pada dinding bejana tersebut akan bekerja suatu gaya. Gaya ini per satuan luas dinding disebut tekanan.

Menurut teori ilmu fisika, gas terdiri dari molekul-molekul yang bergerak terus menerus secara sembarang. Karena gerakan ini, dinding bejana yang ditempati akan mendapat tumbukan terus-menerus pula dari banyak molekul. Tumbukan inilah yang dirasakan sebagai tekanan pada dinding.

Jika temperatur gas dinaikkan, maka gerakan molekul-molekul akan menjadi semakin cepat. Dengan demikian tumbukan pada dinding akan menjadi semakin sering dan dengan implus yang semakin besar. Jadi meskipun volume bejana tetap, tekanan pada dinding akan menjadi lebih besar.

Peristiwa ini dengan mudah dapat dimengerti jika diperhatikan gambar 2.1. Dalam gambar (a) diperlihatkan bejana berisi gas bertemperatur rendah di mana tumbukan pada dinding tidak begitu banyak. Jika temperatur dinaikkan dengan volume tetap (b), tumbukan pada dinding akan semakin banyak, sehingga tekanan akan naik. Pada (c) diperlihatkan keadaan dimana volume bejana diperkecil sedangkan jumlah gas yang ada di dalamnya tetap seperti semula. Di sini ruangan menjadi lebih padat molekul sedangkan luas dinding berkurang. Maka tumbukan yang terjadi persatuan luas dinding akan semakin besar hingga tekanannya juga akan naik. Selain daripada itu, karena

pemampatan ini juga berarti penambahan energi kepada gas maka gerakan molekul menjadi lebih cepat, yang berarti temperaturnya akan naik.



Gambar 2.1 Molekul dan tekanan gas ⁽¹²⁾

Gambar 2.2 Tekanan mutlak dan tekanan lebih⁽¹²⁾

2. Tekanan atmosfer

Tekanan atmosfer yang bekerja di permukaan bumi dapat dipandang sebagai berat kolom udara mulai dari permukaan bumi sampai batas atmosfer yang paling atas. Untuk kondisi standar, gaya berat kolom udara ini pada setiap 1 cm^2 luas permukaan bumi adalah 1,033 kgf. Dengan perkataan lain dapat dinyatakan bahwa tekanan

$$1 \text{ atmosfer (1atm)} = 1,033 \text{ kgf/cm}^2 = 0,1013 \text{ MPa}$$

Tekanan atmosfer juga biasa dinyatakan dalam tinggi kolom air raksa (mm Hg), di mana $1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg}$

3. Tekanan mutlak dan tekanan lebih

Untuk menyatakan besarnya tekanan gas (atau zat cair) dalam suatu ruangan atau pipa biasanya dipakai satuan kgf/cm^2 atau Pa (pascal). Dasar

yang dipakai sebagai harga nol dalam mengukur atau menyatakan tekanan ada dua macam.

- 1) Jika harga nol diambil sama dengan tekanan atmosfer, maka tekanan yang diukur disebut tekanan lebih (*gage pressure*)
- 2) Jika harga nol diambil sama dengan tekanan vakum mutlak maka tekanan disebut tekanan mutlak.

Antara tekanan mutlak dan tekanan lebih terdapat hubungan sebagai berikut:

$$\text{Tekanan mutlak} = \text{tekanan lebih} + \text{tekanan atmosfer} \quad (2.3)$$

Dalam penulisan satuan tekanan biasanya perlu ditambahkan keterangan apakah harga yang dimaksud merupakan tekanan mutlak atau tekanan absolut. Jika yang dimaksud adalah tekanan lebih, maka penulisan satuannya dapat dilakukan misalnya sebagai berikut: kgf/cm^2 (g) atau Pa (g), dimana g merupakan singkatan dari gage. Jika yang dimaksud adalah tekanan mutlak, dapat ditulis sebagai: kgf/cm^2 (abs) atau Pa (abs) dimana abs. merupakan singkatan dari absolut atau mutlak.

Dalam praktek biasanya orang memakai tekanan lebih, sedang tekanan mutlak dipakai dalam teori.

4. Tabel konversi tekanan

Tekanan dapat dinyatakan dalam berbagai satuan. Dalam prakteknya seringkali diperlukan untuk mengubah harga tekanan dalam suatu satuan menjadi harga dalam satuan lainnya. Untuk memudahkan perhitungan dapat

dipergunakan Table 2.3 yang memberikan faktor-faktor konversi berbagai satuan tekanan.

Tabel 2.3 Daftar Konversi Tekanan⁽⁶⁾

Tekanan	Pa	Bar	kgf/cm ²	atm	mm H ₂ O	mm Hg (Torr)
	1	1 x 10 ⁻⁵	1,019 72 x 10 ⁻⁵	9,869 23 x 10 ⁻⁶	1,019 72 x 10 ⁻¹	7,500 62 x 10 ⁻³
	1 x 10 ⁵	1	1,019 72	9,869 23 x 10 ⁻⁴	1,019 72 x 10 ⁴	7,500 62 x 10 ²
	9,806 65 x 10 ⁴	9,806 65 x 10 ⁻¹	1	9,678 41 x 10 ⁻¹	1,000 0 x 10 ⁴	7,355 59 x 10 ²
	1,013 25 x 10 ⁵	1,013 25	1,033 23	1	1,033 23 x 10 ⁴	7,600 00 x 10 ²
	9,806 65	9,806 63 x 10 ⁻⁵	1,000 0 x 10 ⁻⁴	9,678 41 x 10 ⁻⁵	1	7,355 59 x 10 ⁻²
	1,333 22 x 10 ²	1,333 22 x 10 ⁻³	1,359 51 x 10 ⁻³	1,315 79 x 10 ⁻³	1,359 51 x 10	1

2.2 TEORI KOMPRESI

2.2.1 Hubungan antara tekanan dan volume

Jika sebuah alat penyuntik tanpa jarum dan berisi udara atau gas ditutup ujungnya dengan jari telunjuk dan tangkainya ditekan dengan ibu jari, maka pada jari telunjuk akan terasa adanya tekanan yang bertambah besar. (Hal yang sama juga dapat dilakukan dengan pompa sepeda). Bertambahnya tekanan tersebut adalah merupakan akibat dari mengecilnya volume udara di dalam silinder karena dimampatkan oleh torak. Jika volume semakin dkecilkan, tekanan akan semakin besar.

Hubungan antara tekanan dan volume gas dalam proses kompresi tersebut dapat diuraikan sebagai berikut. Jika selama kompresi, temperatur gas dijaga tetap (tidak bertambah panas) maka pengecilan volume menjadi $\frac{1}{2}$ kali akan menaikkan tekanan menjadi 2 kali lipat. Demikian pula jika volume menjadi $\frac{1}{3}$ kali, tekanan akan menjadi 3 kali lipat, dst. Jadi secara umum dapat dikatakan sebagai berikut: "Jika gas dikompresikan (atau diekspansikan) pada temperatur tetap, maka

tekanannya akan berbanding berbalik dengan volumenya". Pernyataan ini disebut hukum Boyle dan dapat dirumuskan pula sebagai berikut: jika suatu gas mempunyai volume V_1 dan tekanan P_1 dimampatkan (atau diekspansikan) pada temperatur tetap hingga volumenya menjadi V_2 , maka tekanannya akan menjadi P_2 di mana

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{tetap} \quad (2.4)$$

Disini tekanan dapat dinyatakan dalam kgf/cm^2 (atau Pa) dan volume dalam m^3 .

2.2.2 Hubungan antara temperatur dan volume.

Seperti halnya pada zat padat dan zat cair, gas akan mengembang jika dipanaskan pada tekanan tetap. Dibandingkan dengan zat padat dan zat cair, gas mempunyai koefisien muai yang lebih besar. Dari pengukuran koefisien muai berbagai gas diperoleh kesimpulan sebagai berikut. "Semua macam gas apabila dinaikkan temperturnya sebesar 1°C pada tekanan tetap, akan mengalami pertambahan volume sebesar $\frac{1}{273}$ dari volume pada 0°C . sebaliknya apabila diturunkan temperturnya sebesar 1°C akan mengalami pengurangan volume dengan proporsi yang sama".

Pernyataan diatas disebut hukum Charles. Hukum ini dapat dirumuskan pula sebagai berikut. Jika suatu gas pada 0°C mempunyai volume sebesar V_0 , maka pada temperatur $t_1^\circ\text{C}$ untuk tekanan yang sama akan mempunyai volume V_1 di mana

$$V^1 = V^0 + \frac{1}{273} \cdot t^1 \cdot V^0 = V^0 \left(1 + \frac{t^1}{273} \right) \quad (2.5)$$

Pada temperatur $t_2^\circ\text{C}$ untuk tekanan yang sama pula gas mempunyai volume

$$V^2 = V^0 \left(1 + \frac{t^2}{273} \right) \quad (2.6)$$

Jika persamaan (2.5) dibagi dengan persamaan (2.6) didapat

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{(273+t_1)}{(273+t_2)} \quad (2.7)$$

Lambang t menyatakan temperatur dalam skala $^{\circ}\text{C}$ (celcius). Skala ini mempunyai harga 0°C pada titik beku air dan harga 100° pada titik didih air pada tekanan atmosfer. Di samping skala celcius, orang dapat memakai skala Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) di mana $0^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{C}$ dan $273^{\circ}\text{K} = 0^{\circ}\text{C}$. Temperatur yang didasarkan pada skala $^{\circ}\text{K}$ ini disebut temperatur mutlak dengan lambang T . Adapun hubungan antara t dan T dapat dituliskan sebagai

$$T(^{\circ}\text{K}) = 273 + t(^{\circ}\text{C}) \quad (2.8)$$

Jika temperatur dinyatakan dalam temperatur mutlak ($^{\circ}\text{K}$), maka Persamaan 2.7 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2.9)$$

Jadi, menurut persamaan (2.9) hukum Charles dapat pula dikatakan sebagai berikut: "Pada proses tekanan tetap, volume gas berbanding lurus dengan temperatur mutlaknya".

2.2.3 Persamaan Keadaan

Hukum Boyle dan hukum Charles dapat digabungkan menjadi hukum Boyle Charles yang dapat dinyatakan sebagai

$$PV = GRT \quad (2.10)$$

Di mana P : Tekanan mutlak (kgf/m^2) atau (Pa)

V : Volume (m^3)

G : Berat Gas (kgf) atau (N)

T : Temperatur Mutlak ($^{\circ}\text{K}$)

R : Konstanta Gas (m/°K)

Konstanta gas R besarnya tetap untuk suatu gas tertentu. Harga R ini berbeda untuk masing-masing gas. Untuk udara kering (pada tekanan 760 mm Hg dan temperatur 0°C) harga R = 29,27 m/°K. untuk udara lembab dengan kelembaban relative 65%, pada 760 mm Hg dan 20°C, harga R = 29,46. harga ini lebih biasa dipakai untuk perhitungan kompresor karena lebih mendekati kondisi yang diisap kompresor pada umumnya. Dalam table 2.5 diberikan harga-harga R untuk berbagai gas yang penting.

Tabel 2.4 Konstanta gas dari berbagai gas⁽⁶⁾.

Konstanta Gas Gas	Udara		Oksigen	Nitrogen	Hidrogen	Karbon dioksida
	Kering (0°C)	Lembab (20°C)	(O ₂)	(N ₂)	(H ₂)	(CO ₂)
R (m/k)	29,27	29,46	26,50	30,26	420,6	19,27

Persamaan (2.10) dapat ditulis secara lain sebagai berikut:

$$Pv = RT \quad (2.11)$$

Di mana $v = V/G$ adalah volum spesifik (m³/kgf) atau (m³/N). karena $v = 1/\gamma$, dimana γ = berat jenis (kgf/m³ atau N/m³) maka persamaan (2.11) dapat pula ditulis sebagai:

$$\frac{P}{\gamma} = RT \quad (2.12)$$

Persamaan (2.11) dapat ditulis sebagai berikut

$$\frac{Pv}{T} = R = \text{Tetap} \quad (2.13)$$

Gas yang memenuhi persamaan ini disebut gas ideal.

2.3 PROSES KOMPRESI GAS

Kompresi gas dapat dilakukan menurut tiga cara yaitu dengan proses isothermal, adiabatik dan politropik. Adapun perilaku masing-masing proses ini dapat diuraikan sebagai berikut:

2.3.1 Kompresi Isotermal

Bila suatu gas dikompresikan, maka ini berarti ada energi mekanik yang diberikan dari luar kepada gas. Energi ini diubah menjadi energi panas sehingga temperatur gas akan naik jika tekanan semakin tinggi. Namun, jika proses kompresi ini dibarengi dengan pendinginan untuk mengeluarkan panas yang terjadi, temperatur dapat dijaga tetap. Kompresi secara ini disebut kompresi isothermal (temperatur tetap). Hubungan antara P dan V dapat diperoleh dari persamaan (2.11). Untuk $T = \text{tetap}$ persamaan tersebut menjadi

$$Pv = \text{tetap}$$

Persamaan ini dapat ditulis sebagai

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{Tetap} \quad (2.13)$$

Yang ekuivalen dengan persamaan (2.4)

Kompresi isothermal merupakan suatu proses yang sangat berguna dalam analisa teoritis, namun untuk perhitungan kompresor tidak banyak kegunaannya. Pada kompresor yang sesungguhnya, meskipun silinder didinginkan sepenuhnya, adalah tidak mungkin untuk menjaga temperatur udara yang tetap di dalam silinder. Hal ini disebabkan oleh cepatnya proses kompresi (beberapa ratus sampai seribu kali per menit) di dalam silinder.

2.3.2 Kompresi Adiabatik

Jika silinder diisolasi secara sempurna terhadap panas, maka kompresi akan berlangsung tanpa ada panas yang keluar dari gas atau masuk ke dalam gas. Proses semacam ini disebut adiabatik.

Dalam praktek, proses adiabatik tidak pernah terjadi secara sempurna karena isolasi terhadap silinder tidak pernah dapat sempurna pula. Namun proses adiabatik sering dipakai dalam pengkajian teoritis proses kompresi.

Hubungan antara tekanan dan volume dalam proses adiabatik dapat dinyatakan dalam persamaan.

$$P \cdot V^k = \text{tetap}$$

Atau

$$P_1 \cdot V_1^k = P_2 \cdot V_2^k = \text{tetap} \quad (2.14)$$

Di mana $k = C_p/C_v$.

Jika rumus ini dibandingkan dengan rumus kompresi isothermal dapat dilihat bahwa untuk pengecilan volume yang sama, kompresi adiabatik akan menghasilkan tekanan yang lebih tinggi dari pada proses isothermal. Sebagai contoh, jika volume diperkecil menjadi $1/2$, maka tekanan pada kompresi adiabatik akan menjadi 2,64 kali lipat, sedangkan pada kompresi isothermal hanya menjadi 2 kali lipat.

Karena tekanan yang dihasilkan oleh kompresi adiabatik lebih tinggi dari pada kompresi isothermal untuk pengecilan volume yang sama, maka kerja yang diperlukan pada proses kompresi adiabatik juga lebih besar.

2.3.3 Kompresi Politropik.

Kompresi pada kompresor yang sesungguhnya bukan merupakan proses isothermal karena ada kenaikan temperatur, namun juga bukan proses adiabatik karena ada panas yang dipancarkan keluar. Jadi proses kompresi yang sesungguhnya, ada diantara keduanya dan disebut kompresi politropik. Hubungan antara P dan V pada proses politropik ini dapat dirumuskan sebagai.

$$P \cdot V^n = \text{tetap}$$

Atau

$$P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n = \text{Tetap} \quad (2.15)$$

Disini n disebut indeks politropik dan harganya terletak antara 1 (proses isothermal) dan k (Proses adiabatik). Jadi: $1 < n < k$. Untuk kompresor biasa, $n = 1,25 - 1,35$.

Dari rumus ini, dengan $n = 1,25$, pengecilan volume sebesar $V_2/V_1 = 1/2$ misalnya akan menaikkan tekanan menjadi 2,38 kali lipat. Harga ini terletak antara 2,0 (untuk kompresi isothermal) dan 2,64 (untuk kompresi adiabatik).

Tabel 2.5 Hubungan antara volume dan tekanan pada berbagai proses kompresi⁽⁶⁾.

Tekanan Volume	Kompresi Isometrik	n = 1,25 Kompresi Politropik	Kompresi Adiabatik
1	1	1	1
1/2	2	2,38	2,64
1/3	3	3,95	4,66
1/4	4	5,96	6,97
1/5	5	7,5	9,09
1/6	6	9,4	12,3
1/7	7	11,4	15,1
1/8	8	13,5	18,4
1/9	9	15,6	21,7

1/10	10	17,8	25,1
1/11	11	20,0	28,8

Catatan : Tekanan yang dinyatakan di atas adalah tekanan mutlak

2.4 EFISIENSI VOLUMETRIK

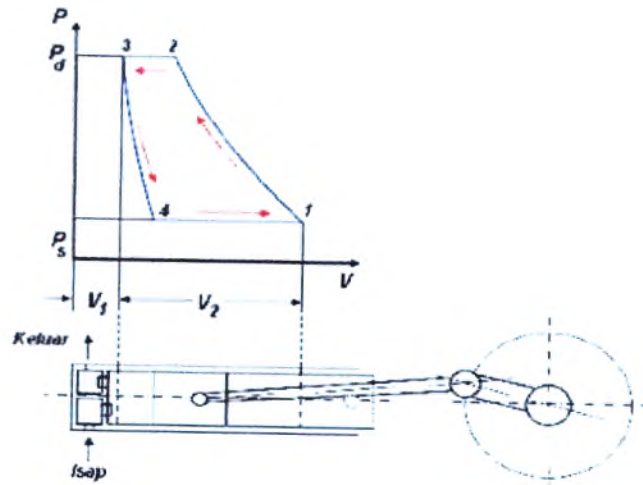
Coba perhatikan sebuah kompresor torak dengan diameter silinder $D(m)$, langkah torak $S(m)$, dan putaran $N(rpm)$. Dengan ukuran seperti ini kompresor akan memampatkan volume gas sebesar $V_s = (\pi/4)D^2 \times S(m^3)$ untuk setiap langkah kompresi yang dikerjakan dalam setiap putaran poros engkol. Jumlah volume gas yang dimampatkan per menit disebut perpindahan torak. Jadi jika poros kompresor mempunyai putaran N (rpm) maka

$$\text{Perpindahan Torak} = V_s \times N = \frac{\pi}{4} D^2 \times S \times N \text{ (m}^3/\text{min)} \quad (2.16)$$

Rumus diatas hanya berlaku untuk kompresor kerja tunggal. Kompresor ini hanya menggunakan ruang di sisi kiri torak untuk bekerja memampatkan udara.

Pada kompresor torak kerja ganda, pemampatan gas terjadi bukan hanya pada waktu torak bergerak ke kiri, tetapi juga pada waktu torak bergerak ke kanan, karena ruang di sebelah kanan torak berlaku juga sebagai kompresor. Luas penampang efektif silinder disebelah kanan torak adalah $\pi/4 (D^2 - d^2)$, di mana d (m) adalah diameter batang torak. Dengan demikian untuk kompresor yang bekerja ganda berlaku rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Perpindahan Torak} &= \frac{\pi}{4} D^2 SN + \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)SN \\ &= \frac{\pi}{4} (2D^2 - d^2) SN, \text{ (m}^3/\text{min)} \end{aligned} \quad (2.17)$$



Gambar 2.3 Diagram P-V dari kompresor⁽⁶⁾.

Perpindahan torak menyatakan kemampuan teoritis torak menghasilkan volume gas tiap menit. Namun dalam kompresor sesungguhnya volume gas yang dikeluarkan adalah lebih kecil dari pada perpindahan torak. Hal ini dapat diterangkan sebagai berikut.

Seperti dilukiskan dalam gambar 2.3 torak memulai langkah kompresinya pada titik (1) (dalam diagram P-V). torak bergerak ke kiri dan gas dimampatkan hingga tekanannya naik ke titik (2). Pada titik ini tekanan di dalam silinder mencapai harga tekanan P_d yang lebih tinggi dari pada tekanan di dalam pipa keluar (atau tangki tekan), sehingga katup ke luar pada kepala silinder akan terbuka. Jika torak bergerak terus ke kiri, gas akan didorong keluar silinder pada tekanan tetap sebesar P_d . Di titik (3) torak mencapai titik mati atas, yaitu titik akhir gerakan torak pada langkah kompresi dan pengeluaran.

Pada waktu torak mencapai titik mati atas ini, antara sisi atas torak dan kepala silinder masih ada volume sisa yang masih besarnya = V_c . Volume ini idealnya harus

sama dengan nol agar gas dapat didorong seluruhnya ke luar silinder tanpa sisa. Namun dalam prakteknya harus ada jarak (*clarance*) di atas torak agar torak tidak membentur kepala silinder. Selain itu juga harus ada lubang-lubang laluan pada katup-katup.

Karena adanya volume sisa ini ketika torak mengakhiri langkah kompresinya di atas torak masih ada sejumlah gas dengan volume sebesar V_c dan tekanan sebesar P_d . Jika kemudian torak memulai langkah isapnya (bergerak ke kanan), katup isap tidak dapat terbuka sebelum sisa gas di atas torak berekspansi sampai tekanannya turun dari P_d menjadi P_s . Dalam gambar 2.3 katup isap baru mulai terbuka di titik (4) ketika tekanan sudah mencapai tekanan isap P_s . Di sini pemasukan gas baru mulai terjadi dan proses pengisapan ini berlangsung sampai titik mati bawah (1).

Dari uraian di atas dapat dilihat bahwa volume gas yang di isap tidak sebesar volume langkah torak sebesar V_s melainkan lebih kecil, yaitu hanya sebesar volume isap antara titik mati bawah (1) dan titik (4).

Adapun efisiensi volumetris η_v didefinisikan sebagai

$$\eta_v = \frac{Q_s}{Q_{th}} \times 100\%$$

Di mana, Q_s : volume gas yang dihasilkan, pada kondisi tekanan dan temperatur isap (m^3/min)

Q_{th} : Perpindahan Torak (m^3/min)

Besarnya efisiensi volumetrik ini dapat dihitung secara teoritis berdasarkan volume gas yang dapat dihisap secara efektif oleh kompresor pada langkah isapnya, seperti telah diuraikan diatas. Dari perhitungan tersebut diperoleh rumus yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\eta_v \approx 1 - \epsilon \left\{ \left(\frac{P^d}{P^s} \right)^{1/n} - 1 \right\}^{(6)} \quad (2.18)$$

Di mana, ϵ : V_c/V_s , Volume sisa (clearance) relatif,

P^d : Tekanan Keluar dari silinder tingkat pertama (kgf/cm² abs)

P^s : Tekanan Isap dari silinder tingkat pertama (kgf/cm² abs)

n : Koefisien ekspansi gas yang tertinggal di dalam volume

sisa, untuk udara, $n = 1,2 \text{ kg/cm}^3$

Tanda \approx berarti "kira-kira sama dengan", karena rumus (2.18) diperoleh dari perhitungan teoritis. Adapun harga η_v yang sesungguhnya adalah sedikit lebih kecil dari harga yang diperoleh dari rumus diatas karena adanya kebocoran melalui cincin torak dan katup-katup, serta tahanan pada katup-katup.

2.5 Aspek-aspek Teoritis Tambahan⁽⁶⁾.

Berikut ini diberikan suatu ringkasan yang ada hubungannya dengan pengujian yang penulis lakukan berikut dengan rumus-rumus yang digunakan.

2.5.1 Analisa massa udara (kg/cm³)

$$P.V = m.R.T$$

Dimana : P = Tekanan Udara Masuk (kg/cm²)

V = Volume Silinder (cm³)

m = Massa Udara (kg/cm²)

R = Konstanta Gas 0.2871 (KJ/kg^oK)

T = Temperatur (°K)

2.5.2 Kompresi Ratio (γ_P)

$$\gamma_P = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P'_2 + P_0}{P'_1 + P_0}$$

P_1 = Tekanan Masuk (kg/cm^2) abs

P_2 = Tekanan Keluar (kg/cm^2) g

P_0 = Tekanan Mutlak 1,013 kg/cm^2

2.5.3 Temperatur Ratio (γ_T)

$$\gamma_T = \frac{T_2}{T_1} = \frac{T'_2 + 273}{T'_1 + 273}$$

T_1 = Temperatur Masuk ($^{\circ}\text{K}$)

T_2 = Temperatur Keluar ($^{\circ}\text{K}$)

2.5.4 Harga Index Politropis (n)

Bila : $P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n$ dan $P_1 = (T_2/T_1)^{n/n-1} \cdot P_2$

Dengan cara menurunkan rumus diatas maka akan diperoleh harga n, yaitu :

$$n = \frac{\log \gamma_P}{\log \gamma_P + \log \gamma_T}$$

2.5.5 Kerja Politropis (W_{p_1})⁽⁵⁾

Dari persamaan (1) :

$$W_{p_1} = m' \cdot R \cdot T_1 \left[\frac{n}{n-1} \right] \left(\gamma_T^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \text{ (KW)}$$

- Dimana :
- m = Aliran massa udara (kg/s)
 - R = Konstanta Gas = 0.2871 (KJ/Kg^oK)
 - T_1 = Temperatur Udara Masuk (°K)
 - n = Index Politropis
 - γ_p = Pressure Ratio

2.5.6 Effisiensi Volumetris⁽⁵⁾

$$\eta_{vol} = \frac{Q_s}{Q_{th}} \times 100\%$$

Di mana Q_s = volume gas yang dihasilkan, pada kondisi tekanan dan temperatur isap (m³/min) G

Q_{th} = Perpindahan Torak (m³/min)

$$Q_{th} = \frac{\pi}{4} D^2 \times S \times N \text{ (m}^3/\text{min)}$$

Maka, efisiensi volumetrik :

Dengan menggambarkan diagram $\eta_{vol} - \gamma_p$, akan terlihat bahwa harga efisiensi volumetrik akan menurun sebanding dengan penambahan P

2.5.7 Kerja Isothermal (Wiso)⁽⁵⁾

Untuk tingkat pertama :

$$W_{iso} = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \gamma_p$$

2.5.8 Kerja Mekanis (W_{mech})

$$W_{mech} = 0.0591 \times 10^3 \times N \times T$$

Dimana : N = Putaran motor listrik (rpm)

T = Torsi motor listrik (Nm)

2.5.9 Harga – Harga Efisiensi⁽⁵⁾

Efisiensi Thermal : $\eta_{th} = \frac{W_{iso}}{W_p} \times 100\%$

Efisiensi Isothermal "overall" : $\eta_{iso} = \frac{W_{mech}}{W_{iso}} \times 100\%$

Efisiensi Mekanis : $\eta_{mech} = \frac{W_{mech}}{W_p} \times 100\%$

