

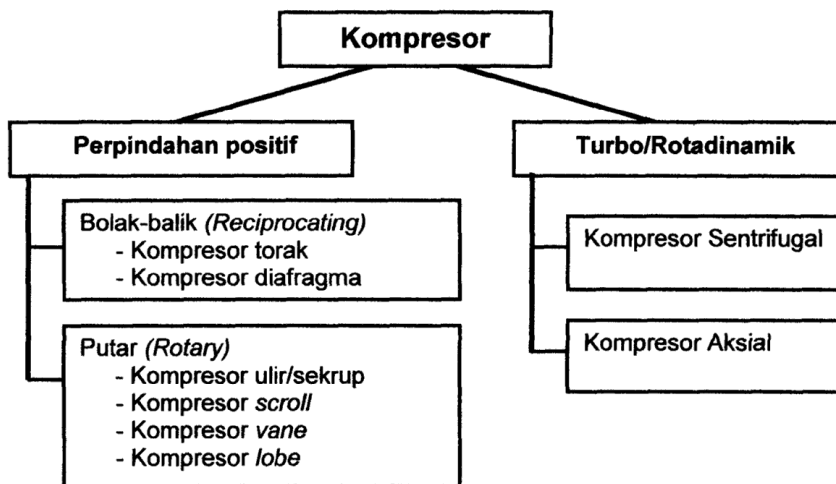
2. STUDI LITERATUR

2.1 Kompresor dan Jenis-Jenis Kompresor

Kompresor adalah mesin fluida yang berfungsi untuk memampatkan udara atau gas sehingga menghasilkan udara atau gas yang bertekanan. Udara yang dihisap untuk dimampatkan umumnya bertekanan atmosfer, namun ada pula kompresor yang menghisap udara atau gas yang bertekanan lebih tinggi dari tekanan atmosfer, kompresor ini sebagai penguat (*booster*) atau pengkompresi lanjut. Selain itu, ada pula kompresor yang menghisap udara atau gas yang bertekanan lebih rendah dari tekanan atmosfer, kompresor ini berfungsi sebagai pompa vakum.

Prinsip kerja kompresor secara umum adalah menghisap udara atau gas yang kemudian dimampatkan dengan cara memperkecil volume ruangan yang mengurungnya sehingga tekanan menjadi naik. Udara atau gas yang bertekanan ini dapat langsung digunakan, seperti pada turbin gas, atau disimpan dahulu di dalam tangki yang berfungsi sebagai penyimpan energi (Ir. Ali Mahmudi, 2010).

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1, kompresor terbagi dalam dua kategori yang berbeda yaitu *positive displacement* dan *dynamic*.

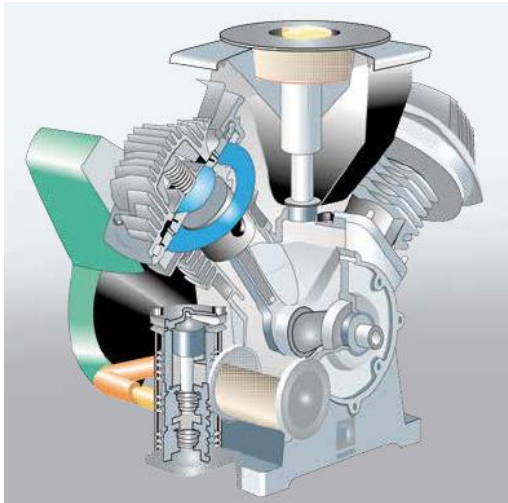


Gambar 2. 1 Jenis - jenis kompresor

Sumber: Ir. Ali Mahmudi, M. E. (2010). *Buku bahan ajar "pompa dan kompresor"*

2.1.1 *Positive Displacement Compressor*

a) *Reciprocating compressor*



Gambar 2. 2 *Piston compressor*

Sumber: Atlas Copco. (2015). *Compressed air manual 8th edition*.

Unit kompresor *reciprocating* adalah jenis peralatan yang paling umum yang mampu mengompresi udara. Prinsip operasinya adalah sebagai berikut: Silinder menyedot sejumlah udara, yang kemudian dikompresi oleh piston yang sedang bergerak. Untuk kompresi, dimungkinkan untuk menggunakan kedua sisi piston. Unit kompresor bolak-balik dua tahap menghasilkan udara dengan kualitas tingkat tinggi dan digunakan secara besar-besaran dalam proses industri. Untuk mengurangi keausan dinding silinder dan piston, unit silinder disuplai dengan oli, yang menyebabkan kualitas udara yang disuplai lebih buruk yang dicampur dengan partikel oli kecil (Giampaolo, 2010).

Berdasarkan tingkat tekanan *outlet*, kompresor *reciprocating* dibagi menjadi unit tekanan rendah (dari 5 hingga 12 bar), unit tekanan sedang (dari 2 hingga 100 bar) dan unit tekanan tinggi (dari 0 hingga 1000 bar). Dengan jumlah tahap kompresi, unit kompresor *reciprocating* bisa *multi-stage*, dua tahap dan satu tahap. Dalam kompresor *multi-stage*, penting untuk menghindari peningkatan suhu gas terkompresi yang berlebihan (tidak lebih dari 180°C), karena ada risiko ledakan dan kebakaran. Menurut versi desain, mesin ini dibagi menjadi unit stasioner dan mobile (*portabel*).

Spesifikasi berbagai modifikasi kompresor *reciprocating* berbeda secara signifikan. Oleh karena itu, bagian ini menyajikan spesifikasi dalam bentuk yang disederhanakan untuk tiga kelompok utama unit: stasiun industri, gas dan bergerak. Stasiun kompresor industri beroperasi pada tekanan 50 bar. Kinerja unit tersebut adalah 350 m³/jam, dayanya mencapai 30 kW pada kecepatan 500 rpm. Unit-unit ini secara aktif digunakan di pembangkit listrik, pabrik baja, untuk keperluan militer, dalam sistem hidrolik, untuk mengisi balon.

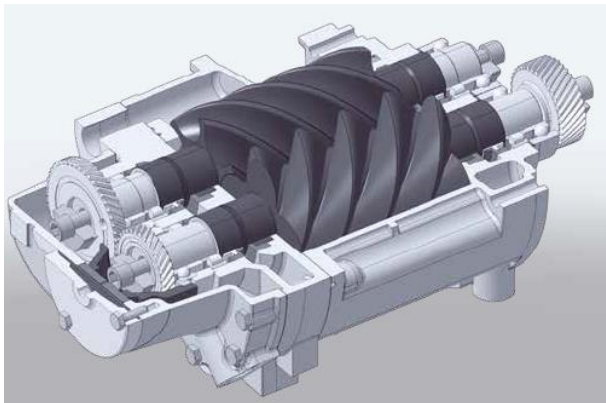
Parameter utama stasiun kompresor gas reciprocating adalah kapasitas dan daya kompresor gas. Tergantung pada ukurannya, unit tersebut dibagi menjadi kecil, sedang dan besar. Dengan demikian, kapasitas kompresor gas berkisar antara 83 hingga 8098 m³/jam tergantung pada ukurannya. Daya dapat bervariasi dari 30 hingga 600 kW dan tergantung pada ukuran kompresor. Parameter teknis utama kompresor bergerak adalah kisaran tekanan sekitar 50 bar, kapasitas (dalam 37m³) dan kemurnian nitrogen (hingga 99%). Suhu operasi tidak kurang dari -40°C dan tidak lebih dari +40°C (Borremans, 2019).

Tabel 2. 1 Kelebihan dan kekurangan *reciprocating compressor*

Kelebihan	Kekurangan
Digunakan untuk tekanan yang tinggi	Udara yang keluar memiliki suhu yang tinggi
Biaya yang lebih murah	Tingkat Kebisingan yang tinggi
Mudah dipasang	Tidak dapat bekerja selama 24 jam

Sumber: Atlas Copco. (2015). *Compressed air manual 8th edition*.

b) *Rotary compressor*



Gambar 2. 3 *Screw compressor*

Sumber: Atlas Copco. (2015). *Compressed air manual 8th edition*.

Tabel 2. 2 Kelebihan dan kekurangan *screw compressor*

Kelebihan	Kekurangan
Kapasitas aliran massa yang besar	<i>Oil injected</i> memiliki sisa oli
Tidak terlalu berisik	Memiliki rotasi yang tinggi
Dapat dioperasikan 24 jam	Sulit dengan lingkungan yang kotor

Sumber: Atlas Copco. (2015). *Compressed air manual 8th edition*.

Kompresor jenis putar ini dapat menghasilkan tekanan yang tinggi, kompresor ini menghasilkan getaran yang relatif kecil dan menghasilkan keluaran lebih tinggi dibandingkan dengan kompresor piston. Hal ini disebabkan sudu-sudu pada kompresor putar, yang merupakan elemen bolak-balik, mempunyai massa yang jauh lebih kecil dari pada piston. Selain itu kompresor putar tidak memerlukan katup (Hanlon, 2001).

Kompresor sekrup adalah peralatan yang sangat kompetitif yang memiliki parameter teknis berikut: tingkat efisiensi yang tinggi (hingga 95%, untuk referensi: efisiensi unit kompresor *reciprocating* tidak melebihi 60%); tingkat kinerja kompresor dapat mencapai 40m³/menit, tekanan absolut di *outlet* hingga 9kgf/cm², daya motor listrik berkisar antara 45 hingga 315 kW, berat dari 1.730 hingga 5.830 kg (Borremans, 2019).

Rotary screw compressor menggunakan rotor yang berbentuk dua buah *helical screws* untuk mengkompresikan udara. Udara masuk dari sisi hisap (*suction side*) dan mengalir melalui ulir seiring dengan perputaran rotor *male* dan *female*. Ruangan presisi yang diciptakan antara rotor mengkompresi udara sehingga udara dapat mengalir pada kompresor dan keluar pada sisi buang (*exhaust side*). Jenis *Rotary Screw Air Compressor* banyak dipilih karena keuntungannya yaitu menghasilkan udara bertekanan tinggi dalam volume yang besar, tidak berpotensi menimbulkan *pulsation or surging of flow* dan memiliki aliran yang *continuous* dibandingkan dengan jenis *reciprocating air Compressor*. *Rotary Screw Compressor* dibedakan menjadi dua yaitu *double screw* dan *single screw*.

Double screw compressor, seperti yang diketahui sebelumnya bahwa *double screw compressor* bekerja dengan menggunakan dua rotor (*helical Screws*) untuk memampatkan udara, yaitu rotor laki dan rotor perempuan, Rotor memiliki bentuk yang berbeda, tetapi sesuai satu sama lain, Ketika rotor mulai berputar, udara akan terjebak di satu sisi antara rotor. Karena rotor terus berputar, udara akan terdorong sampai ke ujung rotor. *Double screw compressor* memiliki dua jenis, yaitu jenis *oil free* dan jenis *oil inject*.

- *Oil free*

Cara kerja kompresor ini sama dengan kompresor tipe *oil injected* bedanya hanyalah kompresor ini benar-benar bebas dari minyak pelumas. Hal ini dimungkinkan karena ruang kompresi antara rotor yang sangat kecil sehingga menghasilkan udara bertekanan namun tidak menyebabkan keausan pada rotor karena masih ada celah diantara rotor. Karena tidak ada minyak pelumas yang diinjeksikan selama kompresi, kompresi biasanya dilakukan dalam dua tahap. Tujuannya adalah agar udara yang dihasilkan tidak terlalu panas karena kompresi yang terlalu tinggi.

- *Oil injected*

Adalah *screw compressor* yang menggunakan prinsip minyak pelumas yang diinjeksikan secara langsung ke ruang kompresi rotor dan juga *bearing*. Fungsinya adalah untuk mendinginkan dan melumasi komponen kompresor dan mengurangi gesekan antar komponen. Udara bertekanan yang bercampur dengan minyak pelumas menuju *oil/air separator* untuk memisahkan udara dengan minyak pelumas agar udara bertekanan tersebut bisa digunakan.

Sistem *single screw* hampir sama dengan *double screw compressor*, yang membedakannya adalah penggunaan satu buah ulir yang diapit dua buah komponen gear yang berputar dan mengkompresi udara. *Single screw air compressor* bekerja dengan menggunakan 1 buah *Screw* dan 2 buah *star wheels*, Kompresi dimulai setelah udara yang terhisap mengisi bagian alur atas dan bawah sekrup utama, Karena *screw compressor* memiliki dua (Atlas Copco, 2015).

Adapun bagian-bagian pada *screw compressor* sebagai berikut:

- *Intake Filter*

Berfungsi untuk menyaring debu dan partikel-partikel kecil yang ada di udara sebelum masuk ke kompresor.

- *Separator*

Berfungsi memisahkan oli dengan udara hasil kompresi dan penampungan oli, kemudian diinjeksikan kembali ke kompresor untuk melumasi rotor pada mesin kompresor.

- *Aftercooler*

Untuk mendinginkan udara dan oli yang telah mengalami kompresi agar temperatur udara dan oli lebih rendah. Pada *aftercooler* terdapat *heat exchanger* yang dibantu oleh *fan motor* untuk menurunkan temperatur udara dan oli.

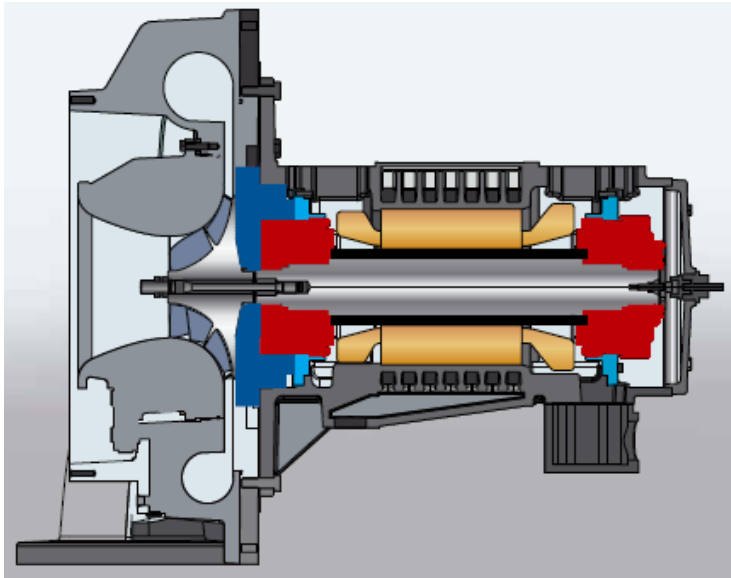
- *Fluid filter*

Berfungsi untuk memisahkan kotoran dari oli yang melewati *separator* dan *aftercooler*

2.1.2 *Dynamic Compressor*

Dua jenis *dynamic compressor* yang digunakan saat ini adalah kompresor aksial dan kompresor sentrifugal. Kompresor aksial digunakan terutama untuk aplikasi *horsepower* menengah dan tinggi, sedangkan kompresor sentrifugal digunakan dalam aplikasi *horsepower* rendah.

a) Kompresor sentrifugal



Gambar 2. 4 Kompresor Sentrifugal

Sumber: Atlas Copco. (2015). *Compressed air manual 8th edition*.

Kompresor sentrifugal dicirikan oleh aliran pelepasan radialnya. Udara ditarik ke tengah impeler yang berputar dengan bilah radial dan didorong keluar menuju perimeter impeler oleh gaya sentrifugal. Pergerakan radial udara menghasilkan kenaikan tekanan dan pembangkitan energi kinetik secara bersamaan. Sebelum udara diarahkan ke pusat impeller tahap kompresor berikutnya, ia melewati *diffuser* dan *volute* di mana energi kinetik diubah menjadi tekanan. (Giampaolo, 2010)

Kompresor sentrifugal, seperti kompresor aksial, adalah mesin dinamis yang mencapai kompresi dengan menerapkan gaya inersia ke gas (percepatan, perlambatan, putaran) dengan cara memutar impeler. Umumnya gas masuk kompresor tegak lurus terhadap sumbu dan berputar di inlet impeller (mata) untuk mengalir melalui impeller. Aliran melalui impeller terjadi pada satu atau lebih bidang yang tegak lurus terhadap sumbu atau poros mesin.

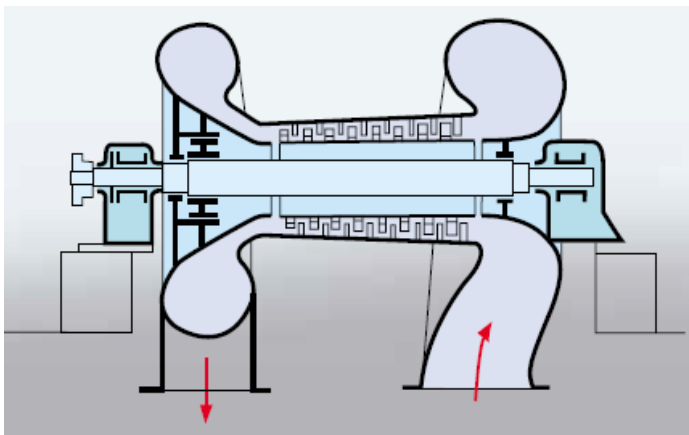
Sentrifugal merupakan kompresor yang bekerja *continuous*, dengan sedikit bagian yang bergerak lebih sesuai digunakan pada volume yang besar dimana dibutuhkan bebas minyak pada udaranya. Kompresor ini dikenal berbeda karakteristiknya jika dibandingkan dengan mesin pada rasio kompresi menghasilkan perubahan besar pada hasil kompresi dan efisiensinya, Mesin sentrifugal lebih sesuai diterapkan untuk kapasitas besar diatas 12,000 cfm. Kecepatan poros impeller sangat tinggi mencapai 15.000-100.000 rpm. Unit-unit ini secara aktif digunakan di pembangkit listrik, pabrik baja, untuk keperluan militer, dalam sistem hidrolik, untuk mengisi balon (Borremans, 2019).

Tabel 2. 3 Kelebihan dan kekurangan *centrifugal compressor*

Kelebihan	Kekurangan
Rasio kompresi yang lebih tinggi	Efisiensi lebih rendah daripada kompresor aksial
Pembuatannya relatif mudah	Laju aliran massa rendah

Sumber: Atlas Copco. (2015). *Compressed air manual 8th edition*.

b) Kompresor aksial



Gambar 2. 5 Kompresor aksial

Sumber: Atlas Copco. (2015). *Compressed air manual 8th edition*.

Kompresor aksial memiliki aliran aksial, di mana udara atau gas melewati poros kompresor melalui barisan bilah yang berputar dan diam. Dengan cara ini, kecepatan udara berangsur-angsur meningkat pada saat yang sama ketika bilah stasioner mengubah energi kinetik menjadi tekanan. Kompresor ini menghasilkan udara yang *continuous*. Kompresor aksial digunakan untuk laju aliran volume konstan dan tinggi pada tekanan yang relatif sedang, misalnya, dalam sistem ventilasi. Mengingat kecepatan rotasi tinggi kompresor aksial, secara ideal digabungkan ke turbin gas untuk pembangkit listrik dan tenaga pesawat (Giampaolo, 2010).

Tabel 2. 4 Kelebihan dan kekurangan axial *compressor*

Kelebihan	Kekurangan
Memiliki efisiensi yang tinggi	Biaya yang mahal
Kapasitas aliran massa yang besar	

Sumber: Atlas Copco. (2015). *Compressed air manual 8th edition*.

2.2 Hukum Termodinamika

Hukum Termodinamika I dikenal juga dengan hukum kekekalan energi. Hukum ini mengatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan selama proses tetapi hanya bisa dikonversi ke bentuk energi lain (Cengel & Boles, 2015). Hukum Termodinamika I ini dapat dirumuskan menjadi Persamaan (2.1).

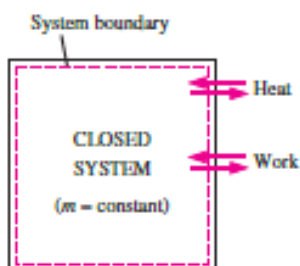
$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[(h_{out} - h_{in}) + \left(\frac{v_{out}^2 - v_{in}^2}{2} \right) + g(z_{out} - z_{in}) \right] \quad (2.1)$$

Keterangan:

- $\dot{Q}$: Energi kalor dalam sistem (kW)
- $\dot{W}$: Kerja dalam sistem (kW)
- $\dot{m}$: Laju alir massa (kg/s)
- h_{out} : entalpi udara saat keluar (kJ/kg)
- h_{in} : entalpi udara saat masuk (kJ/kg)
- v_{out} : kecepatan udara saat keluar (m/s²)
- v_{in} : kecepatan udara saat masuk (m/s²)
- z_{out} : posisi ketinggian udara saat keluar (m)
- z_{in} : posisi ketinggian udara saat masuk (m)
- g : percepatan gravitasi (m/s²) = 9,82 m/s²

a) Sistem Tertutup

Suatu energi yang bisa melewati *boundary* dari sistem tertutup adalah *heat* dan *work*. Jadi sistem tertutup hanya terdiri dari jumlah massa yang tetap. (Cengel & Boles, 2015)



Gambar 2. 6 Sistem tertutup

Sumber: Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: an engineering approach* (8 ed).

$$Q - W = \Delta E \quad (2.2)$$

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (2.3)$$

Keterangan:

Q : Energi kalor dalam sistem (J)

W : Kerja dalam sistem (J)

ΔE : Perubahan Energi sistem (J)

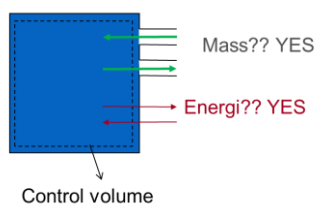
ΔU : Perubahan energi dalam (J)

ΔKE : Perubahan energi kinetik (J)

ΔPE : Perubahan energi potensial (J)

b) Sistem Terbuka

Sistem terbuka terkait dengan ruang, dimana massa dan energi dapat mengalir melalui sistem. Sistem terbuka juga disebut sebagai *control volume*.



Gambar 2. 7 Sistem terbuka

Sumber: Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: an engineering approach* (8 ed).

Pada kompresor memerlukan *input* daya. Perpindahan panas dari kompresor diabaikan kecuali adanya pendinginan. Energi potensial pada kompresor dapat diabaikan. Perubahan kecepatan dalam perangkat kompresor juga rendah sehingga energi kinetik dapat diabaikan (Cengel & Boles, 2015). Dari pernyataan tersebut maka untuk kompresor dapat dirumuskan dalam persamaan 2.4

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_{out} - h_{in}) \quad (2.4)$$

2.3 Gas Ideal

Pada tahun 1662, Robert Boyle, seorang Inggris, mengamati selama eksperimennya dengan ruang vakum bahwa tekanan gas berbanding terbalik dengan volumenya. Pada tahun 1802, orang

Prancis J. Charles dan J. Gay-Lussac secara eksperimental menentukan bahwa pada tekanan rendah volume gas sebanding dengan suhunya. Itu adalah,

$$Pv = RT \quad (2.5)$$

di mana konstanta proporsionalitas R disebut konstanta gas. Persamaan 2.5 disebut persamaan keadaan gas ideal, atau hanya hubungan gas ideal, dan gas yang mematuhi hubungan ini disebut gas ideal (sebelumnya disebut gas sempurna). Dalam persamaan ini, P adalah tekanan absolut, T adalah suhu absolut, dan v adalah volume spesifik.

Konstanta gas R berbeda untuk setiap gas dan ditentukan dari:

$$R = \frac{R_u}{M} \quad (2.5)$$

di mana R_u adalah konstanta gas universal dan M adalah massa molar (juga disebut berat molekul) gas. Konstanta R_u sama untuk semua zat, dan nilainya adalah

$$R_u = \begin{matrix} 8.31447 \text{ kJ/kmol.K} \\ 8.31447 \text{ kPa.m}^3/\text{kmol.K} \\ 1.985888 \text{ Btu/kbmol.R} \end{matrix} \quad (2.6)$$

Massa molar M secara sederhana dapat didefinisikan sebagai massa satu mol (juga disebut gram-mol, disingkat gmol) suatu zat dalam gram, atau massa satu kmol (juga disebut kilogram-mol, disingkat kgmol) dalam kilogram. Ketika kita mengatakan massa molar nitrogen adalah 28, itu berarti massa 1 kmol nitrogen adalah 28 kg, atau massa 1 lbmol nitrogen adalah 28 lbm. Artinya, $M = 28 \text{ kg/kmol} = 28 \text{ lbm/lbmol}$. Massa suatu sistem sama dengan massa produk molarnya M dan jumlah mol (jumlah mol) N :

$$m = MN \quad (2.7)$$

Persamaan keadaan gas ideal dapat ditulis dalam bentuk:

$$PV = mRT \quad (2.8)$$

Gas ideal adalah zat imajiner yang mematuhi hubungan $Pv = RT$. Telah diamati secara eksperimen bahwa hubungan gas ideal yang diberikan mendekati perilaku P - v - T gas nyata pada kepadatan rendah. Pada tekanan rendah dan suhu tinggi, kerapatan gas berkurang, dan gas berperilaku sebagai gas ideal dalam kondisi ini.

Dalam jangkauan kepentingan praktis, banyak gas yang sudah dikenal seperti udara, nitrogen, oksigen, hidrogen, helium, argon, neon, kripton, dan bahkan gas yang lebih berat seperti karbon dioksida dapat diperlakukan sebagai gas ideal dengan kesalahan yang dapat diabaikan (seringkali kurang dari 1 persen). Gas padat seperti uap air di pembangkit listrik tenaga uap dan uap refrigeran di lemari es, bagaimanapun, tidak boleh diperlakukan sebagai gas ideal (Cengel & Boles, 2015).

2.4 Ducting

Tujuan dari sistem saluran adalah untuk mengirimkan sejumlah udara tertentu ke setiap diffuser di ruang yang dikondisikan pada tekanan tertentu. Kebanyakan saluran berbentuk bulat atau persegi panjang. Saluran logam biasanya dilapisi dengan bahan *fibrous glass* di sekitar peralatan distribusi udara dan untuk jarak tertentu dari peralatan. Sisa saluran logam kemudian dibungkus atau ditutup dengan insulasi dan penghalang uap.

Sistem saluran harus hampir bebas dari kebocoran, terutama ketika saluran berada di luar ruangan yang dikondisikan. Kebocoran udara dari sistem ke luar menghasilkan kerugian langsung yang sebanding dengan jumlah kebocoran. *Losses* pada tekanan yang dipilih untuk desain sistem saluran merupakan pertimbangan penting. Dari sudut pandang biaya pertama, saluran harus kecil. Namun, saluran kecil cenderung memiliki kecepatan udara yang tinggi, tingkat kebisingan yang tinggi, dan kehilangan tekanan total yang besar (Persons, 1997).

2.5 Penurunan Tekanan di Dalam Saluran Lurus

Persamaan dasar untuk menghitung penurunan tekanan fluida yang mengalir melalui saluran udara lurus dengan penampang persegi adalah:

$$\Delta P = f \times \frac{L}{D_{eq}} \times \frac{V^2}{2} \times \rho \quad (2.9)$$

Dimana:

ΔP = penurunan tekanan (Pa)

f = factor gesek

L = panjang

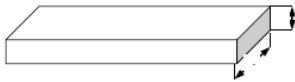
D_{eq} = diameter ekivalen saluran (m)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

Factor gesekan f adalah fungsi dari bilangan Reynolds dan kekasaran relative perpumaan saluran (ϵ/D), dengan ϵ adalah kekasaran absolut. Nilai factor gesekan didapatkan dengan cara mengeplotkan bilangan Reynolds dan kekasaran relative pada diagram moody. Sedangkan D_{eq} dihitung dengan rumus:

$$D_{eq} = \frac{4 \times \text{luas penampang}}{\text{perimeter}} = \frac{4 ab}{2 (a + b)} \quad (2.10)$$



Gambar 2. 8 Penampang saluran lurus

Sumber: Rachmayanti, S. A. (2015). *Perhitungan ulang sistem pengondisian udara pada lantai 3 mall di Surabaya*.

2.6 Penurunan Tekanan di Dalam Sambungan

a) Pengecilan Penampang

Persamaan Bernoulli digunakan sebagai dasar untuk menghitung penurunan tekanan pada suatu pengecilan penampang

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} \quad (2.11)$$

Karena:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{A_1}{A_2}$$

$$\Delta P = \rho \times \frac{V^2}{2} \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right] \quad (2.12)$$

Dimana:

ΔP = penurunan tekanan (Pa)

V_1 = kecepatan aliran fluida 1 (m/s)

V_2 = kecepatan aliran fluida 2 (m/s)

ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

A_1 = Luas penampang 1 (m²)

A_2 = Luas penampang 2 (m²)



Gambar 2. 9 Aliran melalui bagian saluran yang mengecil

Sumber: Rachmayanti, S. A. (2015). *Perhitungan ulang sistem pengondisian udara pada lantai 3 mall di Surabaya*.

b) Belokan (Elbow)

Elbow yang paling sering digunakan pada sistem saluran udara adalah jenis elbow 90°. Menurut Weisbach, Penurunan tekanan di dalam suatu belokan disebabkan oleh penyempitan

penampang pada bagian 1 menuju penampang yang lebih luas. Persamaan dasar untuk menghitung penurunan tekanan fluida yang mengalir melalui saluran udara *elbow* 90° dengan penampang persegi adalah:

$$\Delta P = C \times \frac{V^2}{2} \times \rho \quad (2.13)$$

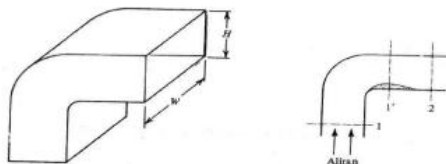
Dimana:

ΔP = penurunan tekanan (Pa)

C = Koefisien gesek

ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)



Gambar 2. 10 Aliran melalui bagian saluran yang mengecil

Sumber: Rachmayanti, S. A. (2015). *Perhitungan ulang sistem pengondisian udara pada lantai 3 mall di Surabaya*.

2.7 Uncertainty Analysis

Dalam sebagian besar kasus, taksiran terbaik yang tersedia dari harapan atau nilai harapan terhadap suatu besaran yang bervariasi secara acak, yang diperoleh dari n pengamatan berulang yang saling bebas dalam kondisi pengukuran yang sama adalah nilai rata-rata dari hasil n pengamatan (Figliola & Beasley, 2011):

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (2.14)$$

Dimana:

$\bar{X}$ = Rata-rata dari data

X_i = data yang diambil

n = Jumlah data

Standar deviasi adalah suatu taksiran sebaran populasi dimana n nilaitersebut diambil, yaitu:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.15)$$

Jika hasil pengukuran x terhadap variabel yang sama ditentukan dari n pengamatan, ketidakpastian yaitu u dapat diestimasi dari:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.16)$$

Ukuran ketidakpastian perlu untuk memenuhi kemungkinan yang memadai yang diistilahkan dengan ketidakpastian bentangan, yang dinyatakan dengan simbol U , dan diperoleh dari mengalikan $u_c(y)$ dengan caktor cakupan, yang dinyatakan dengan simbol k .

2.8 Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)

Kalor adalah bentuk energi yang dirasakan manusia. Energi mewujudkan keadaan dimana jumlah energi yang dipindahkan dari manusia dan sekitarnya mencapai keseimbangan termal. Perpindahan panas merupakan sifat dasar alam sekitar, yaitu Hukum Termodinamika yang berbunyi bahwa kalor berpindah dari tekanan tinggi menuju ke tekanan yang lebih rendah. Perpindahan panas tersebut dibagi menjadi tiga mekanisme, yaitu sebagai berikut:

2.8.1 Radiasi

Perpindahan kalor radiasi adalah pertukaran energi kalor dalam bentuk gelombang elektromagnetik antara dua atau lebih objek pada suhu berbeda, yang dipisahkan oleh ruang atau perantara transparan atau tidak menyerap gelombang kalor. Straaten (1967) menyatakan bahwa perpindahan kalor dari atap ke *ceiling* terutama berlaku secara radiasi, bukan konveksi ataupun pergerakan udara. Radiasi tidak dipengaruhi oleh pengalih udara meskipun suhu udara boleh dikurangi sedikit karena pengalih udara.

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh materi dalam bentuk gelombang elektromagnetik (atau foton) sebagai akibat dari perubahan konfigurasi elektron atom atau molekul. Tidak seperti konduksi dan konveksi, perpindahan panas oleh radiasi tidak memerlukan kehadiran media perantara. Faktanya, perpindahan panas melalui radiasi paling cepat (pada kecepatan cahaya) dan tidak mengalami redaman dalam ruang hampa. Ini adalah bagaimana energi matahari mencapai bumi (Cengel & Boles, 2015).

2.8.2 Konduksi

Konduksi adalah perpindahan energi dari partikel yang lebih energik dari suatu zat ke partikel yang kurang energik yang berdekatan sebagai akibat interaksi antar partikel. Konduksi dapat terjadi pada zat padat, cair, atau gas. Dalam gas dan cairan, konduksi disebabkan oleh tumbukan dan difusi molekul selama gerakan acak mereka. Dalam padatan, ini disebabkan oleh kombinasi getaran molekul dalam kisi dan transpor energi oleh elektron bebas. Minuman kaleng dingin di ruangan yang hangat, misalnya, akhirnya menghangat hingga mencapai suhu ruangan sebagai akibat perpindahan panas dari ruangan ke minuman melalui kaleng aluminium secara konduksi (Cengel & Boles, 2015).

2.8.3 Konveksi

Konveksi adalah mode transfer energi antara permukaan padat dan cairan atau gas yang berdekatan yang bergerak, dan ini melibatkan efek gabungan dari konduksi dan gerakan fluida. Semakin cepat gerakan fluida, semakin besar perpindahan panas konveksi. Dengan tidak adanya gerakan fluida curah, perpindahan panas antara permukaan padat dan fluida yang berdekatan adalah dengan konduksi murni. Kehadiran gerakan massal fluida meningkatkan perpindahan panas antara permukaan padat dan fluida, tetapi juga memperumit penentuan laju perpindahan panas (Cengel & Boles, 2015). Contoh konveksi adalah terjadinya perpindahan panas dari satu sumber panas akibat adanya pergerakan udara. Terdapat dua jenis konveksi, yaitu:

- a) Konveksi alamiah, merupakan pergerakan atau aliran energi fluida yang terjadi akibat perbedaan massa jenis fluida tersebut, serta tidak ada tenaga luar yang mendorongnya. Bila suhu fluida tinggi, ia akan menjadi lebih ringan dan mulai bergerak ke atas. Contoh konveksi alamiah yang terjadi dalam kehidupan sehari-hari adalah sistem ventilasi rumah, serta aliran asap pada cerobong asap.
- b) Konveksi paksa merupakan suatu kejadian dimana fluida dipaksa mengalir ke tempat tertentu oleh tenaga dari luar, misalnya dengan kipas angin.