

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Vakum

Vakum berasal dari bahasa Latin “vacuo” yang artinya ruangan tidak ada udara, sedangkan istilah teknisnya adalah suatu ruangan yang mempunyai kerapatan gas yang sangat rendah. Untuk menjelaskan keadaan vakum digunakan tekanan dengan satuan yang disebut Torr, mbar atau Pascal (Pa). Kevakuman suatu sistem diklasifikasikan menurut tinggi rendahnya tekanan dan hubungan antara tekanan dengan kerapatan gas. Besar kecilnya ruang vakum akan berkaitan dengan jumlah gas yang harus dipompa, dan beban gas yang dipompa tidak hanya sisa udara/gas yang ada dalam ruang vakum, tetapi ditambah oleh gas-gas yang masuk melalui dinding, setelah kevakuman mencapai kondisi mantap. (Darsono, et al., 2003).

Vakum menurut (Suprpto & Widodo, 2017) Vakum adalah kondisi ruangan yang sebagian dari udara dan gas lainnya telah dikeluarkan sehingga tekanan di dalam ruangan tersebut di bawah tekanan atmosfer. Dengan kata lain, vakum berarti ruangan yang mempunyai kandungan kerapatan gas (partikel, atom dan molekul) atau tekanan gas yang tersebut lebih rendah dibandingkan kondisi di atmosfer. Jadi kondisi vakum adalah kondisi tekanan gas di dalam ruangan di bawah tekanan atmosfer. Kondisi vakum dapat dinyatakan dengan tekanan didasarkan tekanan absolut maupun kevakuman. Tekanan absolut yaitu tekanan yang diukur dari kondisi nol absolut yang biasa dinyatakan dalam Torr, mbar (milibar) atau N/m^2 (newton. m^2 atau pascal). Pengukuran kevakuman (vakum) didasarkan dari tekanan 1 atmosfer absolut atau nol gauge (nol terukur) yang biasa juga dinyatakan dalam Torr, mbar atau N/m^2 . Satuan tingkat kevakuman yang digunakan sebagai standar internasional (SI).

$$1 Pa = 1 N/m^2 = 7,501 \times 10^{-3} Torr = 10^{-2} mbar.$$

Hukum dasar untuk gas ideal yang disebut hukum Boyle-Mariotte yaitu:

$$\frac{P \cdot V}{T} = konstan \dots \dots \dots (2.1)$$

(Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto & Widodo, Hal 2)

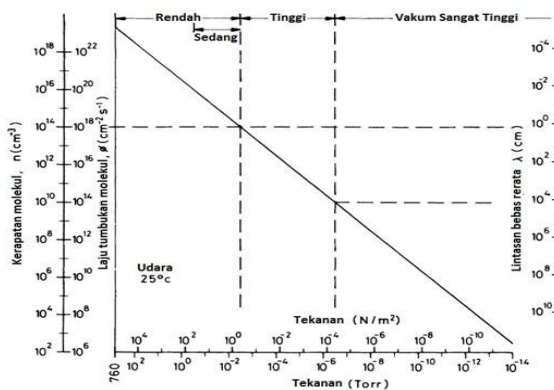
Dengan P tekanan, V volume dan T temperatur absolut gas.

Tingkat kevakuman menurut Alexander Roth dan Dorothy M. Hoffman di dalam buku Pengenalan Teknologi Vakum (suprpto dan Widodo, 2017) dibagi

menjadi 3 (tiga) yaitu: Vakum rendah dan sedang, vakum tinggi, dan vakum sangat tinggi.

No	Tingkat Kevakuman	Rentang Kevakuman (Torr)
1	Rendah dan Sedang	$760 - 10^{-2}$
2	Tinggi	$10^{-3} - 10^{-7}$
3	Sangat Tinggi	$10^{-7} - 10^{-16}$

Sedangkan menurut Jhon F.O'Hanlon dibagi menjadi 6 (enam) yaitu: vakum rendah, vakum Sedang, vakum tinggi, vakum sangat tinggi, vakum ultra tinggi, vakum ekstrim ultra tinggi.



Gambar 2. 1 Hubungan rapat molekul dan lintasan bebas rata-rata sebagai fungsi kevakuman atau tekanan (Torr)

Tabel 2. 1 Rentang tingkat kevakuman menurut John f.O' Hanlon

No	Tingkat Kevakuman	Rentang Kevakuman (Pa)
1	Rendah	$10^5 > p > 3,3 \times 10^3$
2	Sedang	$3,3 \times 10^3 \geq p > 10^{-1}$
3	Tinggi	$10^{-1} \geq p > 10^{-4}$
4	Sangat tinggi (<i>very high</i>)	$10^{-4} \geq p > 10^{-7}$
5	Ultra-tinggi (<i>ultra-high</i>)	$10^{-7} \geq p > 10^{-10}$

6	Ultra-tinggi ekstrem (<i>ekstrem ultra high</i>)	$10^{-10} \geq p$
---	--	-------------------

2.2 Tekanan

Menurut Anis dkk (2008:4) Tekanan merupakan besarnya gaya yang diterima oleh luasan daerah yang menerima gaya tersebut. Di dalam pompa, tekanan digunakan untuk menaikkan fluida dari suatu tempat ke tempat lain dengan cara memampatkan fluida. Jika permukaan suatu zat menerima gaya dari luar maka permukaan zat yang menerima gaya tegak lurus tersebut akan mengalami tekanan.

$$P = \frac{F}{A} \dots \dots \dots (2.2)$$

(Khairul Vandy hantoro, 2016, .Hal 17)

Dimana:

P = Tekanan (kg/ms²)

F = Gaya (kgm/s²)

A = Luas permukaan (m²)

Menurut (Suprpto & Widodo, 2017) Tekanan biasanya diberi notasi atau simbol P dan didefinisikan sebagai gaya standar yang mengenai permukaan dibagi dengan luas permukaan yang dikenai gaya tersebut.

Dalam teknik vakum, tingkat kevakuman dinyatakan dalam satuan tekanan. Ada berbagai jenis tekanan antara lain: tekanan absolut (Pabs), tekanan total (Pt), tekanan parsial (Pp), tekanan uap jenuh (Ps), tekanan standar/normal (Pn) dan tekanan kerja (Pw).

2.2.1 Tekanan absolut (Pabs)

Tekanan *absolut* ditentukan berdasarkan tekanan mutlak. Karena didasarkan pada tekanan mutlak maka untuk tekanan atmosfer dinyatakan 1 atmosfer (absolut) atau 0 atmosfer (*gauge*).

2.2.2 Tekanan total (Pt)

Tekanan total suatu gas di dalam bejana (*vessel*) adalah jumlah tekanan parsial dari berbagai jenis gas yang ada di dalam bejana. Di dalam bejana molekul-molekul/atom-atom gas bergerak dengan kecepatan tertentu dan saling bertumbukan baik antar molekul/atom.

2.2.3 Tekanan parsial (Pp)

Tekanan parsial suatu gas terjadi jika gas di dalam bejana terdiri dari beberapa jenis gas sehingga masing-masing molekul/atom gas tersebut mentransmisikan momentumnya pada dinding bejana.

2.2.4 Tekanan jenuh (P_s)

Tekanan jenuh suatu gas adalah jika gas tersebut ditekan pada temperatur tetap maka tidak terjadi penambahan tekanan melainkan terjadi kondensasi.

2.2.5 Tekanan standar atau tekanan normal (P_n)

Tekanan standar atau tekanan normal adalah tekanan atmosfer yang besarnya $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa (N/m}^2) = 1013,25 \text{ mbar} = 76 \text{ cmHg} = 760 \text{ mmHg (Torr)}$.

2.2.6 Tekanan akhir (P_{akhir})

Tekanan akhir dalam teknologi vakum adalah tekanan terendah yang dapat dicapai dalam sistem vakum. Tekanan akhir yang dapat dicapai ini tidak hanya tergantung pada laju pengisapan pompa atau ukuran pompa, namun dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor yang mempengaruhi tekanan akhir (kevakuman akhir) dalam teknologi vakum antara lain: tekanan penguapan minyak pelumas, perapat (seal) yang digunakan pada pompa, tingkat kebersihan permukaan dan laju kebocoran pada bejana.

2.3 Persamaan Kontinuitas

Menurut Sunyoto (2008: 53) Suatu fluida yang mengalir melewati suatu penampang akan selalu memenuhi hukum kontinuitas, yaitu laju massa fluida yang masuk akan selalu sama dengan laju massa fluida yang keluar. Persamaannya sebagai berikut:



Gambar 2. 2 Aliran Fluida

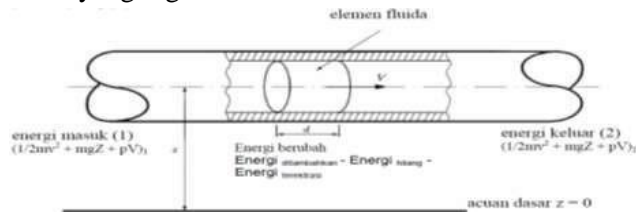
$$(\rho Av)_1 = (\rho Av)_2 \dots \dots \dots (2.3)$$

(*Khairul Vandyhantoro, 2016, Hal 18*)

2.4 Persamaan Bernoulli

Menurut Anis dkk (2008: 8) Apabila suatu fluida cair (tak mampu mampat) mengalir melewati suatu penampang pipa dan saluran dengan mengabaikan hambatan

aliran (fluida non viskositas), maka akan memenuhi hukum yang dirumuskan oleh Bernoulli Persamaan yang digunakan adalah:



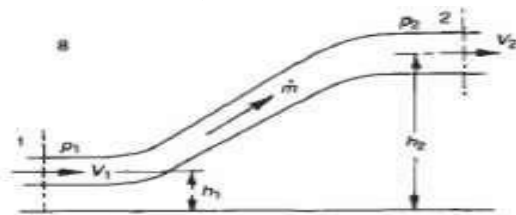
Gambar 2. 3 Perubahan Energi pada Saluran

Gambar 2.3 menunjukkan dimana penampang saluran pipa diasumsikan sebagai permukaan yang sempurna, sehingga tidak ada gesekan antara aliran fluida cair dengan permukaan pipa dan tidak ada energi yang ditambahkan, maka dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

Energi masuk = Energi keluar

$$(gZ + \frac{v^2}{2} + \frac{pV}{m})_1 = (gZ + \frac{v^2}{2} + \frac{pV}{m})_2 \dots \dots \dots (2.4)$$

(Khairul Vandyhantoro, 2016, Hal 19)



Gambar 2. 4 Profil Saluran Bernoulli

Dibagi dengan m (Nm)

$$(gZ + \frac{v^2}{2} + \frac{pV}{m})_1 = (gZ + \frac{v^2}{2} + \frac{pV}{m})_2 \dots \dots \dots (2.5)$$

(Khairul Vandyhantoro, 2016, Hal 19)

$$\frac{v}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Dibagi dengan g menjadi bentuk persamaan head (m).

$$(Z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g})_1 = (Z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g})_2 \dots \dots \dots (2.6)$$

(Khairul Vandyhantoro, 2016, Hal 20)

Dimana:

$$\frac{v}{m} = \frac{1}{p}$$

Dikalikan gZ menjadi bentuk persamaan tekanan N/m²

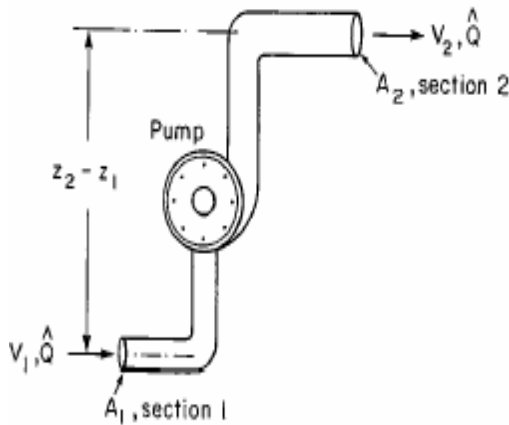
$$(pgz + p\frac{v^2}{2g} + p)1 = (pgZ\frac{v^2}{2} + p)2 \dots \dots \dots (2.7)$$

(Khairul Vandyhantoro, 2016, Hal 20)

Dimana:

Z = ketinggian pipa aliran (m)

g = percepatan gravitasi (m/s²)



Gambar 2.5 Perubahan Energi pada Pompa

Apabila pada penampang saluran ditambahkan energi, pompa akan memberikan energi tambahan pada aliran fluida sebesar Zat, sehingga persamaan menjadi:

$$\left(Z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{pg}\right)1 + Htp = \left(Z\frac{v^2}{2} + \frac{p}{pg}\right)2 + Hlos \dots (2.8)$$

Keterangan:

Head total pompa = Htp

Head tekan pompa (Ht) = $\frac{\Delta p}{pg} \dots \dots \dots (2.9)$

Dengan ΔP = Pd – Ps $\dots \dots \dots (2.10)$

$$\text{Head Kecepatan Pompa (Hk)} = \frac{vd^2 - vs^2}{2g} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$\text{Head potensial pompa} = Z \dots\dots\dots(2.12)$$

(*Khairul Vandyhantoro, 2016, Hal 21*)

2.5 Hukum Gas Dalam teknologi vakum

Dalam teknologi vakum selalu berhubungan dengan hukum-hukum gas. Ada beberapa hukum-hukum yang terkait dengan gas antara: hukum Boyle, hukum Amontons, hukum Charles, hukum Dalton, hukum Avogadro dan hukum Graham.

2.5.1 *Hukum Boyle*

Hukum ini menyatakan bahwa perkalian antara tekanan dengan volume suatu gas di dalam bejana adalah tetap (konstan) untuk jumlah gas (molekul/atom) dan temperatur dipertahankan tetap. Jika dinyatakan dalam persamaan adalah

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \text{ (N dan T konstan)} \dots\dots\dots (2.13)$$

$$N = n \cdot V \dots\dots\dots (2.13.a)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 14*)

Hukum Amonton

Hukum ini menyatakan bahwa tekanan dibagi temperatur mutlak suatu gas di dalam bejana adalah tetap (konstan) untuk jumlah gas (molekul/atom) dan volume dipertahankan tetap. Jika dinyatakan dalam persamaan adalah

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \text{ (N dan V Konstan)} \dots\dots\dots (2.14)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 14*)

2.5.2 *Hukum Dalton*

Hukum ini menyatakan bahwa tekanan total dari suatu gas adalah sama dengan jumlah gaya persatuan luas dari tiap-tiap jenis gas di dalam bejana. Jika dinyatakan dalam persamaan adalah

$$P = nkT \dots\dots\dots (2.15)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 15*)

Dengan k adalah konstanta Boltzmann yang nilainya = $1,3804 \times 10^{-23}$ J/K. Jika di dalam bejana terdiri dari beberapa jenis gas maka,

$$P_t = n_1 k T + n_2 k T + n_3 k T + \dots\dots\dots (2.16.a)$$

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \dots \dots (2.16.b)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 15*)

2.5.3 *Hukum Avogadro*

Hukum ini menyatakan bahwa tekanan dibagi jumlah molekul/atom suatu gas di dalam bejana adalah tetap (konstan) untuk temperatur dan volume dipertahankan tetap. Jika dinyatakan dalam persamaan adalah

$$\frac{P_1}{N_1} = \frac{P_2}{N_2} \text{ (T dan V Konstan)} \dots \dots \dots (2.17)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 15*)

2.5.4 *Fluida dan Aliran*

Fluida merupakan suatu zat atau bahan yang dalam keadaan setimbang tidak dapat menahan gaya geser (*shear force*). Fluida dapat pula didefinisikan sebagai zat yang dapat mengalir bila ada perbedaan tekanan. Berdasarkan wujudnya, fluida dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu (Wardawani, 2017):

1. Fluida cair merupakan fluida dengan partikel yang rapat dimana gaya ikat antara molekul-molekul sejenisnya terikat satu sama lain dengan kuat sehingga mempunyai suatu kesatuan yang jelas dan cenderung untuk mempertahankan volumenya meskipun bentuknya sebagian ditentukan oleh wadahnya.
2. Fluida gas merupakan fluida dengan gaya ikat antara molekul-molekul gas sangat kecil jika dibandingkan gaya ikat antar molekul zat cair sehingga menyebabkan molekul-molekul gas menjadi relatif bebas dan selalu memenuhi ruang.

Menurut (Ikbald,S.,2020) Fluida dalam hal ini adalah air memiliki sifat mengalir dari daerah yang tinggi menuju ke daerah yang rendah seperti pada Gambar 2.6 dimana ada dua fluida yang mengalir dari reservoir A menuju reservoir B, aliran fluida ini mengikuti aturan persamaan energi keadaan incompressible keadaan steady yakni :

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_L \dots \dots \dots (2.18)$$

(*Pengaruh tangki vakum, Ikbald,S.,2020,Hal 76*)

Dimana dalam keadaan tersebut

$$P_1=P_2=V_1=V_2=Z_2=0 \dots \dots \dots (2.19)$$

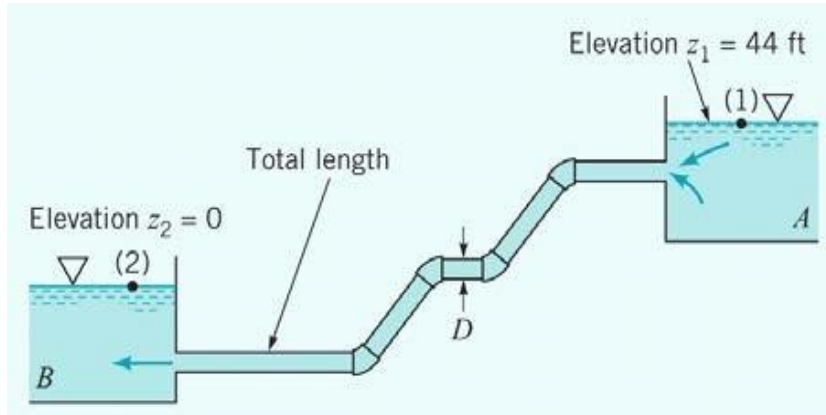
(*Pengaruh tangki vakum,Ikbald,S.,2020,Hal 76*)

$$Z_1 = \frac{v^2}{2g} \left(f \frac{1}{D} + \sum KL \right) \dots \dots \dots (2.20)$$

(Pengaruh tangki vakum, Ikbal, D.S., 2020, Hal 76)

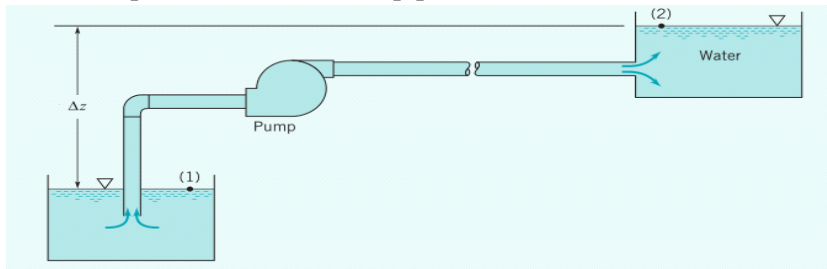
$$V = \frac{33,1}{D^2} \dots \dots \dots (2.21)$$

(Pengaruh tangki vakum, Ikbal, D.S., 2020, Hal 76)



Gambar 2. 6 Aliran Fluida pada dua reservoir

Dari sini dapat diambil kesimpulan bahwa semakin tinggi lokasi z_1 maka kecepatan aliran air dalam pipa akan semakin bertambah.



Gambar 2. 7 Aliran Fluida yang dipengaruhi pompa

Namun berbeda jika aliran tersebut dibalik maka akan membutuhkan sebuah pompa yang mengikuti persamaan energi untuk aliran compressible.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z_1 + h_a = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + f \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum KL \frac{v^2}{2g} \dots (2.22)$$

(Pengaruh tangki vakum, Ikbal, D.S., 2020, Hal 76)

Aliran dalam teknik vakum menentukan laju kevakuman, kebutuhan pompa vakum, komponen vakum khususnya komponen-komponen yang menghubungkan bejana yang divakumkan dengan pompa vakum. Laju kevakuman akan berhubungan dengan waktu yang diperlukan untuk memvakumkan hingga mencapai tingkat kevakuman akhir. Di samping itu juga menentukan tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai. Aliran dalam teknik vakum dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu: aliran kental (*viscous*), aliran transisi, dan aliran menipis/jarang (*rarefied*). Aliran kental dibagi menjadi 2 (dua) yaitu aliran laminar dan aliran turbulen, sedangkan aliran transisi yang juga disebut aliran menengah (*intermediate*) adalah aliran yang terletak di antara aliran kental (*viscous*) dan aliran menipis/jarang (*rarefied*) yaitu pada saat akan terjadi perubahan dari aliran kental ke aliran molekular. Aliran menipis/jarang (*rarefied*) adalah suatu aliran yang terjadi pada saat tekanan dalam suatu aliran telah mencapai kehampaan menengah atau tinggi sehingga aliran yang terjadi disebabkan oleh gerakan molekular. Dengan demikian hambatan tidak dipengaruhi oleh friksi atau gesekan antara molekul/atom dengan permukaan dinding saluran atau di antara molekul/atom itu sendiri

Klasifikasikan aliran laminar atau turbulen ditentukan oleh bilangan Reynold Re (Tabel 2.2), sedangkan untuk aliran menengah (*intermediate*) dan aliran molekular ditentukan oleh bilangan Knudsen D/λ yaitu perbandingan antara diameter pipa (D) dengan lintasan bebas rata-rata molekul/atom (λ), seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Klasifikasi aliran gas pada tekanan rendah

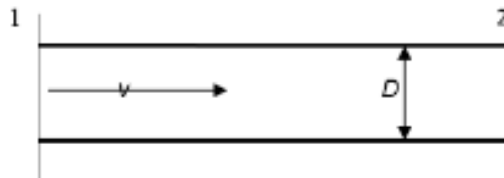
Kondisi Gas	Jenis Aliran	Batasan
Kental (<i>viscous</i>)	Laminar	$Re < 1100$
	Turbulen	$Re > 2100$ $D/\lambda > 110$
Transisi	Menengah (<i>intermediate</i>)	$1 < D/\lambda < 110$
Menipis (<i>rarefied</i>)	Molekular	$D/\lambda < 1$

Jika aliran fluida di dalam sistem vakum seperti ditunjukkan Tabel 2.2, maka besar nilai bilangan Reynold's Re dapat ditentukan dengan persamaan

$$R_e = \frac{\rho v D}{\eta} \dots\dots\dots (2.23)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 20*)

Dengan ρ adalah rapat jenis gas (g/cm³), v kecepatan aliran gas (cm/detik), D diameter pipa (cm) dan η viskositas gas (poise).



Gambar 2.8 Aliran dalam sistem vakum.

Jika dinyatakan dalam jumlah laju aliran gas (Q), maka untuk jumlah laju aliran gas (Q) adalah

$$Q = \rho v \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \dots\dots\dots (2.24)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 20*)

maka kecepatan aliran (v) adalah

$$v = \frac{4 Q}{\pi \rho D^2} \dots\dots\dots (2.24.a)$$

sedangkan rapat jenis gas (ρ) adalah

$$\rho = \frac{M P}{R_o T} \dots\dots\dots (2.24.b)$$

Jika disubstitusikan ke dalam persamaan (3.1) didapatkan

$$R_e = \frac{4 M Q}{\pi R_o T \eta D} \dots\dots\dots (2.25)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 20*)

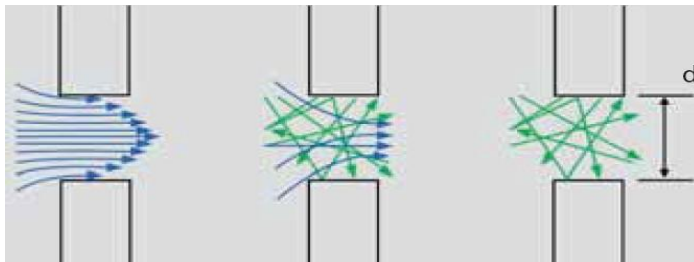
Dengan M adalah berat molekul, R_o konstanta gas universal, T temperature mutlak dan D diameter saluran dalam instalasi sistem vakum.

Bilangan *Knudsen* (Kn) adalah perbandingan antara diameter saluran dalam instalasi sistem vakum (D) dan lintasan bebas rata-rata (λ) molekul/atom gas yang nilainya adalah

$$K_n = \frac{D}{\lambda} \dots\dots\dots (2.26)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 21*)

Berdasarkan jenis aliran maka dapat ditentukan besar daya hantar/konduktansi saluran (C) di dalam pipa pada sistem vakum tersebut, baik untuk aliran kental maupun aliran molekular. Daya hantar saluran (C) adalah kemampuan saluran untuk mengalirkan gas yang divakumkan dan merupakan kebalikan dari hambatan saluran yang disebabkan adanya gesekan antara molekul-molekul/atom-atom gas dengan permukaan saluran atau diantara molekul-molekul/atom-atom gas tersebut. Jenis-jenis aliran ini diilustrasikan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 jenis aliran yang terjadi pada teknik vakum

- | | | |
|------------------|--------------------|------------------------------|
| a. Aliran kental | b. Aliran menengah | c. Aliran molekular |
| $K_n < 0,01$ | $0,01 < K_n < 0,5$ | $K_n > 0,5$ |
| (vakum rendah) | (Vakum sedang) | (vakum tinggi/sangat tinggi) |

Aliran kental (Gambar 2.8a) terjadi pada vakum rendah, aliran ini dibagi menjadi 2 yaitu aliran laminar dan aliran turbulen (bergolak). Pada teknik vakum aliran laminar jarang terjadi karena pada vakum rendah biasanya sistem saluran mempunyai diameter kecil dengan laju aliran besar sehingga jika dihitung bilangan Reynold (Re) yang terjadi akan diperoleh di atas 2100. Hambatan yang mempengaruhi aliran disebabkan oleh gesekan antar molekul/atom dan gesekan antara molekul dengan dinding saluran. Oleh

karena itu untuk menentukan daya hantar saluran biasanya digunakan persamaan daya hantar untuk aliran kental.

Aliran menengah (Gambar 2.9.b) biasanya terjadi pada vakum sedang yaitu saat terjadi transisi (perubahan) dari vakum rendah ke vakum tinggi. Transisi ini jarang terjadi pada daerah saluran pompa vakum rendah (misalnya pompa sudu luncur/pompa rotari) ke pompa vakum tinggi (misalnya pompa difusi atau pompa turbomolekular). Aliran menengah akan terjadi pada daerah saluran pompa vakum tinggi (misalnya pompa difusi atau pompa turbomolekular) ke bejana yang divakumkan untuk mencapai tingkat kevakuman tinggi atau sangat tinggi yaitu saat peralihan dari vakum rendah ke vakum tinggi.

Aliran molekular (Gambar 2.9.c) terjadi pada daerah vakum tinggi baik pada saluran dari pompa vakum tinggi (misalnya pompa difusi atau pompa turbomolekular) ke bejana yang divakumkan untuk mencapai tingkat kevakuman tinggi atau sangat tinggi maupun di dalam bejana yang divakumkan untuk mencapai tingkat kevakuman tinggi atau sangat tinggi. Perpindahan molekul/atom disebabkan karena adanya gerakan secara acak dari molekul/atom. Hal ini karena pada kondisi vakum tinggi atau sangat tinggi, kerapatan molekul/atom sangat rendah sehingga gerakan acak molekul/atom mempunyai lintasan yang sangat besar atau mempunyai lintasan bebas rata-rata (λ) sangat besar dibandingkan dengan diameter saluran.

2.6 Massa Jenis

Menurut Anis dkk (2008: 3) Massa jenis suatu fluida adalah massa per volume. Pada volume fluida yang tetap, massa jenis fluida tetap tidak berubah. Perumusannya adalah sebagai berikut:

$$\rho = \frac{m}{V} \dots \dots \dots (2.27)$$

(*Khairul Vandyhantoro, 2016, Hal 29*)

Dimana:

m = massa (kg)

V = volume (m³)

Properti fluida yang lain yang berhubungan langsung dengan massa jenis adalah volume jenis, berat jenis dan *specific gravity*. Volume jenis adalah kebalikan dari massa jenis yaitu volume fluida dibagi dengan massanya. Untuk berat jenis adalah massa jenis fluida dikalikan dengan percepatan gravitasi atau berat fluida per satuan volume dirumuskan sebagai berikut (Khairul Vandyhantoro, 2016):

$$\gamma = \rho \cdot g \dots\dots\dots (2.28)$$

(Khairul Vandyhantoro, 2016,.Hal 29)

Dimana:

- γ = berat jenis cairan (N/ m³)
- ρ = massa jenis cairan (kg/m³)
- g = percepatan gravitasi = 9,81 (m/s²)

Menurut Munson dkk (2004: 15) Adapun untuk *specific gravity* adalah perbandingan antara kerapatan fluida tersebut dengan kerapatan air pada sebuah temperatur tertentu. Pada kondisi standar (40⁰C, 1 atm) massa jenis air adalah $\rho = 1000$ (kg/m³).

2.7 Debit

Debit aliran adalah nilai yang dipergunakan untuk menghitung kecepatan aliran pada suatu pipa eksperimen. Rumus perhitungan debit aliran adalah (Khairul Vandyhantoro, 2016):

$$Q = \frac{v}{t} \text{ atau } Q = v \cdot A \dots\dots\dots (2.29)$$

(Khairul Vandyhantoro, 2016,.Hal 30)

Dimana:

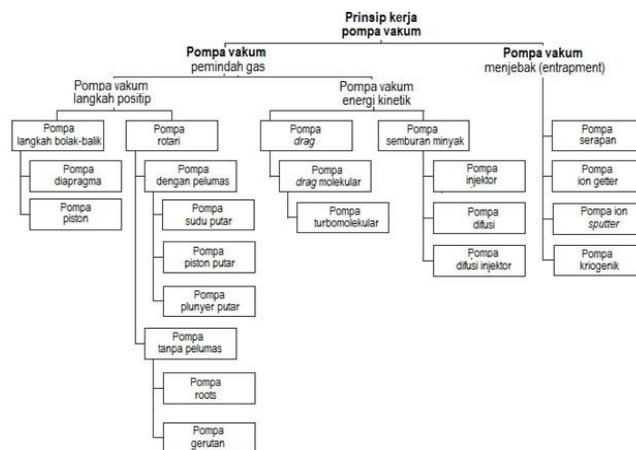
- Q = debit alir aliran (m³/s)
- V = volume fluida (m³)
- t = Waktu (s)

2.8 Aliran Air di Dalam Pipa

Menurut (Wardawani, 2017) Pipa merupakan saluran tertutup yang biasanya berpenampang lingkaran dan digunakan untuk mengalirkan fluida dengan tampang aliran penuh. Tegangan yang terjadi akan menyebabkan terjadinya kehilangan tenaga selama pengaliran. Kehilangan tenaga akibat gesekan dari 2 titik beda ketinggian gaya yang bekerja adalah gaya tekanan, berat zat cair dan gaya geser. Menurut (Wardawani, 2017) semakin panjang pipa keluaran maka debit air yang terbuang akan semakin sedikit.

2.9 Jenis Pompa Vakum

Untuk memvakumkan suatu instalasi sistem vakum dibutuhkan pompa vakum yang harus disesuaikan dengan kebutuhan berdasarkan pada geometri sistem yang divakumkan dan tingkat kevakuman akhir yang diinginkan. Pompa vakum dapat dibedakan berdasarkan pada proses pemvakumannya dan masing-masing mempunyai rentang tekanan operasi (daerah operasi berdasarkan tekanan/kevakuman). Berdasarkan proses pemompaan dibedakan menjadi 2 (dua) yaitu (1) pompa vakum pemindah gas (molekul/atom) dan (2) pompa vakum penjebak (entrapment) gas (molekul/atom). Adapun klasifikasi pompa vakum berdasarkan prinsip kerjanya ditunjukkan pada Gambar 2.10 (Suprpto & Widodo, 2017)



Gambar 2. 10 Klasifikasi pompa vakum berdasarkan prinsip kerja

2.9.1 Pompa Vakum dengan Memindahkan Gas

Untuk pompa vakum dengan memindahkan gas secara garis besar dibagi menjadi 2 (dua) jenis yaitu (1) pompa vakum dengan langkah positif (positive displacement vacuum pump) dan (2) pompa vakum dengan energi kinetik (kinetic vacuum pump). Dasar prinsip kerja dari kedua jenis pompa tersebut sangat berbeda. Prinsip kerja pompa vakum dengan langkah positif adalah untuk memindahkan gas (molekul/atom) dengan mengisap dari sistem yang divakumkan kemudian gas dimampatkan di dalam pompa dan dilanjutkan dengan mengeluarkan dari pompa

2.9.2 Pompa vakum dengan langkah positip

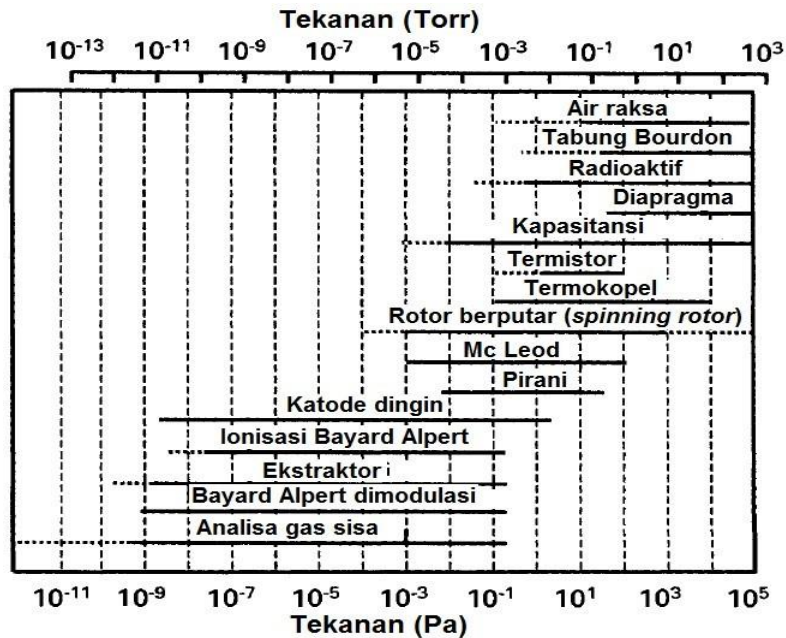
Berdasarkan klasifikasi (Gambar 2.10) jenis-jenis pompa yang termasuk dalam pompa vakum dengan langkah positip cukup banyak, namun yang akan dibahas lebih rinci meliputi: pompa piston, pompa sudu putar, pompa diafragma dan pompa Root. Pompa vakum ini mempunyai kemampuan untuk memvakumkan dari atmosfer ke tingkat kevakuman rendah atau sedang yang tergantung dari jenis pompanya. Untuk jenis pompa yang mempunyai kemampuan hingga ke tingkat kevakuman rendah adalah pompa piston dan pompa diafragma. Adapun yang dapat mencapai ke tingkat vakum rendah dan sedang adalah pompa sudut putar (pompa rotari)

2.10 Alat Pengukur Kevakuman

Menurut (Suprpto & Widodo, 2017) Alat ukur tekanan (manometer) mulai dari tingkat kehampaan rendah (beberapa puluh Torr) hingga tingkat kevakuman sangat tinggi (sekitar 10-14 Torr), sampai saat ini belum ditemukan sehingga belum ada alat ukur kevakuman yang mempunyai rentang atau jangkauan pengukuran pada tekanan tersebut. Hal ini disebabkan karena pada tiap tingkat tekanan gas memberikan efek fisis bagi dasar kerja masing-masing alat ukur. Pengukuran kevakuman secara garis besar dapat dibagi 2 (dua) yaitu (1) pengukuran secara langsung dan (2) pengukuran secara tidak langsung. Pengukuran secara langsung adalah metode pengukuran dengan mengukur langsung besaran yang diukur dan langsung menunjukkan hasilnya, sedangkan pengukuran secara tidak langsung adalah metode pengukuran dengan mengukur besaran melalui sifat besaran yang diukur (data yang dihasilkan belum merupakan besaran yang diukur), selanjutnya data tersebut diolah (dikonversi) menjadi besaran yang diukur.



Gambar 2. 11 Penggolongan pengukuran secara langsung



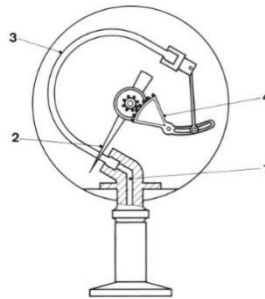
Gambar 2. 12 Daerah pengukuran berbagai jenis manometer

2.10.1 Manometer Pengukuran Langsung

Berdasarkan klasifikasi (Gambar 2.12) jenis-jenis manometer pengukuran langsung menurut prinsip kerjanya dibagi menjadi 2 (dua) yaitu: (1) berdasarkan prinsip kerja secara mekanik dan (2) prinsip kerja menggunakan cairan. Manometer berdasarkan prinsip kerja secara mekanik meliputi: manometer diafragma, manometer tabung Bourdon, dan manometer kapasitansi. Untuk manometer dengan prinsip kerja menggunakan cairan meliputi: manometer pipa-U dan manometer McLeod

- a) Manometer Bourdon Manometer Bourdon banyak digunakan untuk mengukur tekanan-tekanan di atas atmosfer. Namun demikian juga dapat digunakan untuk mengukur tekanan di bawah tekanan atmosfer atau kondisi vakum. Manometer Bourdon mempunyai prinsip kerja secara mekanis yaitu mengukur langsung tekanan gas dengan cara memasukkan gas ke dalam tabung Bourdon seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Daerah pengukurannya untuk rentang kevakuman antara 10³ sampai 1 Torr, bebas digunakan untuk segala macam gas. Namun hanya mempunyai ketelitian untuk pengukuran tekanan sampai 10 mbar [13]. Prinsip kerja manometer Bourdon didasarkan pada perubahan tabung Bourdon akibat perubahan tekanan. Saat tekanan bertambah maka terjadi gerakan pengembangan tabung

Bourdon (3) sehingga menggerakkan lengan pengukur (4) serta menggerakkan jarum pengukur (2) ke arah positif/searah jarum jam. Gerakan ini akan menunjukkan tekanan yang terukur. Jika digunakan untuk mengukur tekanan rendah (vakum) maka akan terjadi pengosongan tabung Bourdon sehingga gerakan jarum pengukur ke arah negatif/berlawanan arah jarum jam.



Gambar 2. 13Manometer Bourdon

1. Penghubung tabung Bourdon ke flens
 2. Jarum pengukur
 3. Tabung Bourdon
 4. Lengan pengukur
- b) Manometer pipa U Dasar kerjanya sama menggunakan masukan tekanan gas namun penunjukannya melalui kolom cairan. Jika pipa U diisi dengan cairan, ujung 1 (satu) dihubungkan dengan ruang vakum dan ujung lainnya dihubungkan dengan tekanan atmosfer maka akan diperoleh beda ketinggian permukaan cairan tersebut. Besar beda ketinggian permukaan cairan ditentukan dengan persamaan

$$P = \rho g h \dots \dots \dots (2.30)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 60*)

Atau

$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} \dots \dots \dots (2.31)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 60*)

Dengan P adalah tekanan, ρ rapat jenis cairan yang digunakan, h tinggi kolom cairan dan g gravitasi. Jadi dengan persamaan (2.3) atau (2.4),

tekanan dapat dinyatakan dengan ketinggian kolom cairan (h). Cairan yang digunakan biasanya air raksa (Hg), daerah pengukurannya 103 - 10⁻¹ Torr dan tidak tergantung pada jenis gas. Tekanan udara standar adalah 1 (satu) atmosfer, jika dinyatakan dalam kolom air raksa adalah 760 mm kolom air raksa dan biasa ditulis dengan 760 mmHg atau 760 Torr

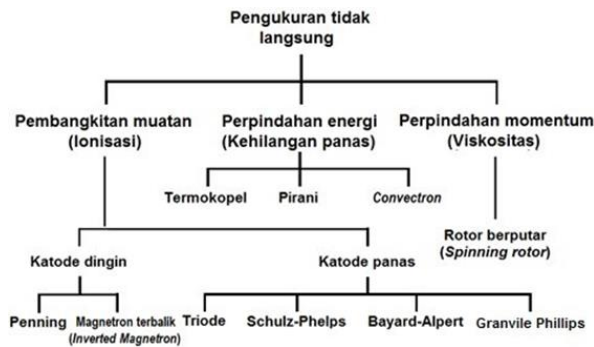
- c) Manometer McLeod pertama kali ditemukan pada tahun 1874 dan dapat digunakan untuk pengukuran tekanan absolut (vakum) antara 1 sampai 10⁻⁶ Torr [2]. Dasar kerjanya sama menggunakan masukan tekanan gas dan proses penunjukannya menggunakan pemampatan gas yaitu berdasarkan hukum Boyle ($PV = \text{konstan}$). Manometer McLeod ditunjukkan pada Gambar 2.14, karena prinsip kerjanya didasarkan pada pemampatan gas maka tidak digunakan untuk gas-gas yang terkondensasi.



Gambar 2. 14 Manometer McLeod

2.10.2 Manometer Pengukuran Tidak Langsung

Berdasarkan klasifikasi (Gambar 2.15) jenis-jenis manometer pengukuran tidak langsung menurut prinsip kerjanya dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu: (1) berdasarkan perpindahan energi (kehilangan panas), (2) berdasarkan pembangkitan muatan (ionisasi) dan (3) berdasarkan perpindahan momentum (viskositas). Manometer berdasarkan perpindahan energi (kehilangan panas) yaitu: manometer termokopel, manometer pirani dan manometer convectron. Untuk manometer berdasarkan pembangkitan muatan (ionisasi) meliputi: (1) manometer katode dingin dan (2) manometer katoda panas. Untuk manometer katode dingin dibagi menjadi 2 (dua) yaitu: manometer Penning dan manometer magnetron terbalik (inverted magnetron), sedangkan manometer katode panas dibagi menjadi 4 yaitu: manometer triode, manometer Schulz-Phelps, manometer Bayard Alpert, dan manometer ion stabil (stabil ion)

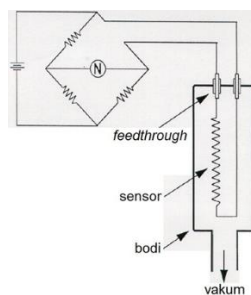


Gambar 2. 15 Penggolongan pengukuran secara tidak langsung

1. Manometer pirani Dasar kerja manometer pirani menggunakan hantaran panas dan proses penunjukannya menggunakan rangkaian luar secara elektronik. Rangkaian sensor manometer ini ditunjukkan pada Gambar 2.16, biasanya sensor dibuat dari kawat wolfram dengan diameter sangat kecil sehingga jika dialiri arus listrik terjadi perubahan temperatur. Akibat perubahan temperatur maka terjadi perubahan tahanan pada sensor dan terjadi perubahan arus listrik yang mengalir. Perubahan ini dipengaruhi oleh perubahan perpindahan energi termal (perpindahan panas) dari sensor ke bodi manometer.

$$P = P_{\text{terbaca}} \times \text{faktor koreksi} \dots \dots \dots (2.32)$$

(*Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 65*)



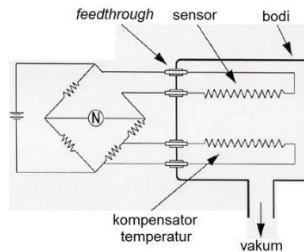
Gambar 2. 16 Rangkaian sensor manometer pirani

2. Dasar kerja manometer convectron sama dengan manometer pirani. Perbedaan dengan manometer pirani terletak pada tambahan kompensator temperatur (Gambar 2.17). Dengan tambahan kompensator ini maka dapat memberikan tambahan rentang pengukuran. Rentang pengukuran tekanan

dapat dimulai dari tekanan atmosfer (760 Torr) hingga mencapai orde 10⁻⁴ Torr. Karena manometer ini mempunyai prinsip kerja sama dengan manometer pirani yaitu perpindahan energi melalui molekul/atom yang menumbuk permukaan panas dan memindahkan ke permukaan yang lebih dingin maka dalam pengukuran juga dipengaruhi oleh sifat-sifat molekul/atom gas untuk memindahkan panas tersebut. Pada umumnya manometer convectron dikalibrasi untuk pengukuran kevakuman dengan udara, sehingga untuk memperoleh pembacaan tekanan yang sebenarnya untuk gas selain udara harus dikalikan dengan faktor koreksi yang besarnya sama dengan faktor koreksi untuk manometer pirani (Tabel 2.3).

$$P = P_{\text{terbaca}} \times \text{faktor koreksi} \dots \dots \dots (2.33)$$

(Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 66)



Gambar 2. 17 Rangkaian sensor manometer convectron

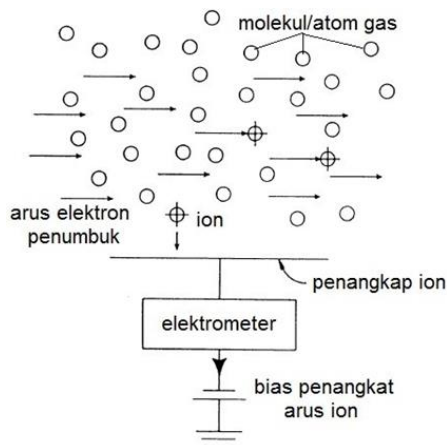
Tabel 2. 3 Faktor koreksi manometer perpindahan energi

Gas	Faktor koreksi	Gas	Faktor koreksi
Nitrogen	1,0	Helium	1,0
Hidrogen	0,77	Neon	1,1
Karbon Monoksida	1,0	Argon	1,4
Gas Asam Arang	0,9	Krypton	2,2
Uap Air Raksa	2,9	Xenon	2,8

Tabel 2. 4 Faktor koreksi manometer ionisasi

Gas	Faktor koreksi	Gas	Faktor koreksi
Nitrogen	1,0	Uap air raksa	0,303
Helium	6,9	Hidrogen	2,4
Neon	4,35	Argon	0,75
Argon	0,83	Karbon monoksida	0,92
Krypton	0,59	Karbon dioksida	0,69
Xenon	0,33	Metana	0,8

3. Manometer Ionisasi Katode Pana. Dasar kerjanya adalah ionisasi gas menggunakan katoda yang dipanaskan, proses penunjukan nya seperti pada manometer pemindahan energi (manometer pirani dan manometer convector) yaitu menggunakan rangkaian luar secara elektronik. Dalam penggunaannya juga ada ketergantungan terhadap jenis gas yang diukur. Pada umumnya manometer ini dikalibrasi untuk pengukuran kevakuman dengan udara, sehingga untuk memperoleh pembacaan tekanan yang sebenarnya untuk gas selain udara harus dikalikan dengan faktor koreksi yang besarnya ditunjukkan pada Tabel 2.4. Besar tekanan sesungguhnya ditentukan dengan persamaan

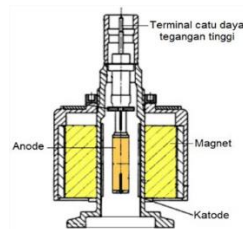


Gambar 2. 18 Proses ionisasi pada manometer ionisasi

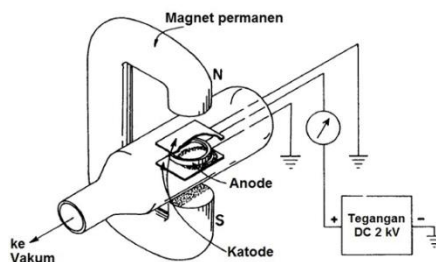
$$P = P_{\text{terbaca}} \times \text{faktor koreks} \dots \dots \dots (2.34)$$

(Pengenalan Teknologi Vakum, Suprpto dan Widodo, Hal 68)

4. Dasar kerja manometer Penning adalah ionisasi gas menggunakan katoda dingin dan proses penunjukannya menggunakan rangkaian luar secara elektronik. Dengan demikian manometer Penning juga merupakan manometer katoda dingin. Bentuk visual dan bagian utama manometer ini ditunjukkan pada Gambar 2.19 dan Gambar 2.20. Dasar konstruksinya (Gambar 2.19) cukup sederhana dengan komponen utama: katode, anode, magnet permanen, dan terminal catu daya. Adapun cara kerjanya ditunjukkan pada Gambar 2.19 yang prinsip kerjanya berdasarkan proses ionisasi (Gambar 2.18). Proses ionisasi ini menggunakan tegangan tinggi sekitar 2 kV yang dicatukan pada katode dan anode melalui terminal catu daya. Di samping itu, dipasang magnet permanen yang digunakan untuk memperpanjang lintasan elektron yang dipercepat dengan tegangan 2 kV agar dapat menumbuk dan mengionisasi molekul lebih efektif.



Gambar 2. 19 Tampang lintang manometer Penning



Gambar 2. 20 Skema manometer Penning

SENGAJA DIKOSONGKAN