

Pengenalan TEKNOLOGI VAKUM

Pengenalan TEKNOLOGI VAKUM

PENGENALAN TEKNOLOGI VAKUM

Disusun oleh
Ir. Suprpto
Dr. Susilo Widodo, M.Eng.



Bejana Vakum Siklotron DECY-13
(DECY=Design Experimental Cyclotron Yogyakarta)

Pengenalan
TEKNOLOGI
VAKUM



Pengenalan **TEKNOLOGI VAKUM**

Disusun oleh:
Ir. Suprpto
Dr. Susilo Widodo, M.Eng.

Editor:
Dr. Pramudita Anggraita
Prof. Drs. Darsono, M.Sc.
Dr. Viktor Malau
Komisi Pembina Tenaga Fungsional
(KPTF) PSTA-BATAN



PENGENALAN TEKNOLOGI VAKUM

Disusun oleh:

Ir. Suprpto
Dr. Susilo Widodo, M.Eng
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator
Badan Tenaga Nuklir Nasional

Editor

Dr. Pramudita Anggraita
Prof. Drs. Darsono, M.Sc.
Dr. Viktor Malau
Komisi Pembina Tenaga Fungsional (KPTF) PSTA-BATAN

Desain Sampul

BI. Wahyudi dan Wisnu

Tata Letak

Diah KK.

Cetakan I, Juli 2017

Penerbit

Pustaka Pelajar (Anggota IKAPI No. 028/DIY/95)

Cileban Timur UH III/548 Yogyakarta 55167

Telp. (0274) 381542, Fax. (0274) 383083

E-mail: pustakapelajar@yahoo.com

ISBN: 978-602-229-765-9

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami haturkan kepada Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan mengajarkan ilmu pengetahuan serta meninggikan derajat atas orang-orang beriman dan berilmu pengetahuan.

Teknologi vakum merupakan teknologi yang sangat penting, baik untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi maupun untuk mendukung teknologi yang dimanfaatkan dalam meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, teknologi vakum sangat dibutuhkan misalnya untuk pembentukan lapisan tipis dan sekarang sudah mulai diterapkan di industri (industri elektronik dan industri otomotif), pengembangan dan penelitian teknologi akselerator dan aplikasinya yang sekarang masih berkembang dan sudah banyak diterapkan baik di industri (misalnya industri kabel dan industri ban mobil) maupun untuk kesehatan (misalnya diagnostik dan terapi kanker, sterilisasi alat-alat kedokteran) serta untuk mendukung industri secara langsung (misalnya untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga maupun otomotif yaitu industri lampu pijar, lampu neon maupun industri termos untuk menyimpan air panas, lampu halogen dan lampu *mercury*).

Dengan selesainya penyusunan buku berjudul “Pengenalan Teknologi Vakum” sehingga dapat kami persembahkan bagi para pengguna, maka merupakan kebahagiaan kami dalam pengabdian. Penyusunan buku ini didasarkan pada pengalaman yang telah dilakukan di Bidang Fisika Partikel PSTA-BATAN (Pusat Sains dan Teknologi Akselerator - Badan Tenaga Nuklir Nasional) Yogyakarta. Pengalaman dan pengetahuan tentang vakum diperoleh dari penyelesaian rancangbangun akselerator khususnya mesin berkas elektron dan rancangbangun perangkat deposisi uap kimia (*chemical vapor deposition/CVD*) khususnya perangkat nitridasi plasma yang sekarang dikembangkan untuk pelapisan *diamond like carbon* (DLC), serta pengoperasian, perawatan dan pemanfaatan akselerator di PSTA-BATAN Yogyakarta (Implantor Ion, Generator Neutron, dan Mesin Berkas Elektron). Peralatan-peralatan tersebut mutlak memerlukan teknologi vakum karena jika tingkat kevakumannya tidak terpenuhi maka tidak akan dapat dioperasikan (berfungsi).

Semoga dengan persembahan buku ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya dalam pemanfaatan teknologi vakum baik untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi maupun untuk mendukung teknologi yang dimanfaatkan dalam meningkatkan kesejahteraan masyarakat khususnya untuk industri maupun kesehatan.

Dengan terbitnya buku ini penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu secara aktif, khususnya rekan-rekan di Bidang Fisika Partikel, kepada Bapak Ir. Puradwi Ismu Wahyono, DEA selaku Kepala Bidang Fisika Partikel yang telah memberikan kesempatan dalam penulisan buku ini, keluarga (isteri dan anak-anak) yang selalu memberikan semangat dan dukungan demi penyelesaian buku ini, Bapak Drs. BA. Tjipto Sujitno, MT., Bapak Drs. Djoko Slamet Pudjorahardjo dan Sdr. Wiwien Andriyanti, MT. atas bantuan dan masukan-masukannya serta berbagai pihak yang tidak dapat kami sebutkan

Akhirnya, tiada gading yang tak retak, atau tidak ada yang sempurna kecuali Allah SWT. Karena itu, jika para pembaca menemukan kesalahan baik secara teknis maupun konsep mohon dapat memberikan masukan kepada penulis untuk perbaikan pada penerbitan berikutnya.

Yogyakarta, Juni 2017

Penyusun

SAMBUTAN

KETUA SEKOLAH TINGGI TEKNOLOGI NUKLIR

BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas karunia rahmat Nya sehingga buku berjudul “Pengenalan Teknologi Vakum” dapat diterbitkan. Buku ini sangat penting dan layak mendapatkan apresiasi, mengingat buku ini merupakan buah karya peneliti bidang fokus teknologi akselerator di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) BATAN.

Buku ini disusun berdasarkan pengalaman langsung para penulis dalam rancangbangun mesin berkas elektron serta pengoperasian, perawatan dan pemanfaatan beberapa jenis akselerator di Bidang Fisika Partikel, PSTA BATAN, yang semuanya membutuhkan dukungan teknologi vakum. Namun demikian, teknologi vakum juga sangat diperlukan seperti di industri komponen otomotif, industri elektronika, dan lain-lain.

Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir (STTN) BATAN adalah institusi pendidikan yang menyelenggarakan tridharma perguruan tinggi di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi (iptek) nuklir yang di dalamnya juga mencakup Teknologi Akselerator dan Aplikasinya. Teknologi Akselerator ini mutlak memerlukan teknologi vakum dalam mempercepat partikel yang akan dimanfaatkan untuk membangkitkan sinar-X, maupun langsung dimanfaatkan untuk iradiasi. Teknologi vakum merupakan materi yang juga dipelajari di STTN untuk mendukung materi kuliah dan praktikum seperti Instrumentasi Nuklir, Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, serta Sistem Instrumentasi dan Kendali Akselerator. Oleh karena itu STTN sangat berkepentingan untuk mendorong terbitnya buku ini dalam mengembangkan pendidikan khususnya di STTN. Semoga buku ini bermanfaat bagi para mahasiswa, dosen dan juga praktisi, baik di bidang teknologi vakum, teknologi dan aplikasi akselerator maupun bidang lainnya yang memerlukan teknologi vakum.

Demikian sambutan kami dan selamat berinovasi semoga bermanfaat bagi semua pihak.

Yogyakarta, 11 Juli 2017
Ketua Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir
Badan Tenaga Nuklir Nasional


Edy Giri Rachman Putra, Ph.D
Ketua STTN - BATAN

SAMBUTAN

Saya bersyukur kepada Allah SWT dan merasa bangga setelah membaca naskah yang ditulis oleh Ir. Suprpto dan Dr. Susilo Widodo, M.Eng. dengan judul “Pengenalan Teknologi Vakum”, dan pada akhirnya dapat diterbitkan dalam bentuk sebuah buku.

Buku tersebut disusun berdasarkan kajian yang telah dilakukan cukup lama dan diimplementasikan oleh penulis yang terlibat dalam kegiatan rancangbangun MBE (Mesin Berkas Elektron) dan perangkat nitridasi ion, serta pengoperasian dan perawatan implantor ion dan generator neutron. Seperti kita ketahui bahwa di PSTA (Pusat Sains dan Teknologi Akselerator) - BATAN Yogyakarta, salah satu kegiatan utamanya adalah melakukan penelitian dan pengembangan teknologi akselerator, dan hingga saat ini telah berhasil dikonstruksi perangkat peralatan generator neutron, implantor ion dan MBE. Perangkat peralatan tersebut masing-masing memerlukan satu unit sistem vakum agar mereka dapat beroperasi sesuai dengan yang diharapkan.

Buku Pengenalan Teknologi Vakum ini memuat cukup rinci tentang dasar teknologi vakum yang menjelaskan hukum gas, lintasan bebas rata-rata dan gerakan molekul gas; kemudian diikuti dengan pembahasan tentang aliran gas dalam teknik vakum. Khususnya bagi praktisi teknologi vakum, buku ini menyajikan berbagai jenis pompa vakum, dan bagaimana cara memilih atau menentukan jenis pompa yang akan digunakan dalam suatu perangkat peralatan, serta prinsip kerja alat ukur, tingkat kevakuman dan pemilihan alat ukur kevakuman yang diperlukan. Selain itu juga disajikan tentang instalasi sistem vakum disertai komponen dan sambungan sistem vakum yang diperlukan, dan beberapa contoh perhitungan instalasi sistem vakum.

Teknologi vakum telah dipelajari dan dikembangkan oleh para ilmuwan cukup lama, mulai dari tingkat kevakuman rendah, sedang dan tinggi, selanjutnya seiring dengan kemajuan teknologi vakum saat ini dapat dicapai tingkat kevakuman sangat tinggi atau ultra tinggi yang mencapai orde 10^{-14} Torr. Teknologi vakum tersebut telah banyak digunakan dalam bidang industri dan dalam bidang Iptek. Dalam bidang Iptek, teknologi vakum banyak digunakan dalam peralatan penelitian yang menghasilkan bahan lapisan tipis seperti peralatan CVD (*Chemical Vapor Deposition*), peralatan *sputtering*,

nitridasi plasma/ion dan lainnya; serta dalam perangkat peralatan akselerator. Di PSTA - BATAN Yogyakarta, beberapa perangkat peralatan akselerator energi rendah seperti implantor ion, generator neutron dan MBE telah berhasil dikonstruksi dengan menggunakan sistem vakum dengan tingkat kevakuman tinggi orde 10^{-6} Torr. Sementara jenis akselerator energi ultra tinggi yang telah dikembangkan di luar negeri, seperti 4 GeV CEBAF (*Continuous Electron Beam Accelerator Facility*), 2 GeV *storage ring of electron-positron collider*, 10 GeV proton synchrotron, fasilitas RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) serta lainnya memerlukan sistem vakum dengan tingkat kevakuman sangat tinggi hingga orde 10^{-14} Torr.

Pada kesempatan ini saya memberikan apresiasi kepada penulis yang telah meluangkan waktunya relatif singkat dan bekerja keras untuk menulis buku ini, yang merupakan sebuah karya ilmiah yang difokuskan dalam bidang teknologi vakum. Harapan saya semoga buku ini bermanfaat bagi para peneliti, terutama bagi para peneliti muda dan praktisi di bidang teknologi vakum dan bidang-bidang lain yang menggunakan teknologi vakum. Dengan membaca dan mempelajari apa yang disajikan dalam buku Pengenalan Teknologi Vakum ini, saya mempunyai keyakinan bahwa para peneliti, terutama para praktisi dapat meningkatkan pengetahuan dan kemampuannya dalam melaksanakan tugas yang berkaitan dengan teknologi vakum.

Yogyakarta, 12 Juli 2017



Prof. Drs. H. Sudjatmoko, SU.

DAFTAR ISI

	Halaman
Sampul	i
Kata Pengantar	v
Sambutan Ketua STTN-BATAN	vii
Sambutan Prof. Drs. H. Sudjatmoko, SU.	viii
Daftar Isi	x
Daftar Gambar	xii
Daftar Tabel	xv
Simbol	xvi
BAB I. PENDAHULUAN	1
1. Sejarah dan Pengertian Vakum	1
2. Aplikasi Teknik Vakum	7
BAB II. DASAR-DASAR TEKNOLOGI VAKUM	9
2.1. Tekanan	9
2.2. Hukum-Hukum Gas	13
2.3. Lintasan Bebas Rata-Rata	16
2.4. Gerakan Molekul Gas	17
BAB III. ALIRAN GAS DALAM TEKNIK VAKUM	19
3.1. Klasifikasi Aliran dalam Teknik Vakum	19
3.2. Daya Hantar Aliran Kental	22
3.3. Daya Hantar Aliran Molekular	25
BAB IV. JENIS-JENIS POMPA VAKUM	29
4.1. Pompa Vakum dengan Memindahkan Gas	30
4.1.1. Pompa vakum dengan langkah positip	30
4.1.2. Pompa vakum energi kinetik	40
4.2. Pompa Vakum dengan Menjebak Gas	50
4.2.1. Pompa ion <i>sputter</i>	50
4.2.2. Pompa kriogenik	51
4.3. Daerah Tekanan Operasi Pompa dan Laju Pemompaan	53
BAB V. ALAT UKUR KEVAKUMAN	57
5.1. Manometer Pengukuran Langsung	57
5.1.1. Manometer Bourdon	59

5.1.2. Manometer pipa U	60
5.1.3. Manometer McLeod	61
5.2. Manometer Pengukuran Tidak Langsung	62
5.2.1. Manometer pirani	64
5.2.2. Manometer <i>convectron</i>	65
5.2.3. Manometer Ionisasi Katode Panas	66
5.2.4. Manometer Penning	68
BAB VI. INSTALASI SISTEM VAKUM	71
6.1. Beban Gas dalam Sistem Instalasi Vakum	72
6.1.1. Gas yang ada di dalam sistem sebelum dipompa	73
6.1.2. Gas yang masuk karena adanya kebocoran	74
6.1.3. Gas yang disebabkan adanya pelepasan gas (<i>outgassing</i>)	75
6.1.4. Gas yang disebabkan adanya penguapan	77
6.1.5. Gas yang masuk dengan cara permeasi melalui dinding	79
6.1.6. Jumlah gas sebagai beban pompa	81
6.1.7. Waktu pemompaan	82
6.1.8. Contoh 1, perhitungan instalasi sistem vakum	83
6.1.9. Contoh 2, perhitungan dan pengujian kevakuman corong pemayar	90
BAB VII. KOMPONEN DAN SAMBUNGAN SISTEM VAKUM	98
7.1. Komponen Sistem Vakum	98
7.2. Sambungan Sistem Vakum	103
7.2.1. Sambungan dapat dilepas	103
7.2.2. Sambungan tetap	104
BAB VIII. PENUTUP	107
DAFTAR PUSTAKA	108

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 1.1. Daerah tekanan positif dan daerah vakum	1
Gambar 1.2. Hubungan rapat molekul dan lintasan bebas rerata sebagai fungsi kevakuman atau tekanan	4
Gambar 1.3. Hubungan ketinggian sebagai fungsi kevakuman	5
Gambar 1.4. Perkembangan teknik vakum	6
Gambar 2.1. Gerakan acak molekul/atom untuk 1 (satu) jenis gas	11
Gambar 2.2. Gerakan molekul/atom untuk 2 (dua) jenis gas	12
Gambar 2.3. Tekanan jenuh (gas dan cairan)	12
Gambar 2.4. Lintasan bebas molekul/atom	16
Gambar 3.1. Aliran dalam sistem hampa	20
Gambar 3.2. Jenis Aliran yang terjadi pada teknik vakum	21
Gambar 3.3. Gerakan molekul/atom pada belokan	27
Gambar 4.1. Klasifikasi pompa vakum berdasarkan prinsip kerja	29
Gambar 4.2. Pompa Piston	31
Gambar 4.3. Pompa sudu putar	32
Gambar 4.4. Detil komponen-komponen pompa sudu putar	33
Gambar 4.5. Prinsip kerja pompa dengan gas <i>ballast</i>	35
Gambar 4.6. Pompa diafragma	38
Gambar 4.7. Prinsip kerja pompa Roots (Lobe)	39
Gambar 4.8. Pompa turbomolekular (jenis horizontal)	41
Gambar 4.9. Pompa turbomolekular (jenis vertikal)	42
Gambar 4.10. Pemindahan momentum pada sudu-sudu pompa turbomolekular	42
Gambar 4.11. Bagian-bagian pompa turbomolekular	43
Gambar 4.12. Kerapatan molekul pada sudu-sudu pompa turbomolekular	44
Gambar 4.13. Pompa difusi	45
Gambar 4.14. Prinsip kerja pompa difusi	45
Gambar 4.15. Tampang lintang pompa difusi	48
Gambar 4.16. Pompa ion	51
Gambar 4.17. Pompa kriogenik	52
Gambar 4.18. Proses regenerasi pompa kriogenik	53
Gambar 4.19. Daerah tekanan operasi untuk berbagai jenis pompa	54
Gambar 4.20. Laju pemompaan pompa sudu putar	54

Gambar 4.21. Laju pemompaan untuk berbagai jenis pompa dibandingkan dengan kecepatan pemompaan maksimum	55
Gambar 4.22. Laju pemompaan instalasi pompa rotari dan difusi	56
Gambar 5.1. Penggolongan pengukuran secara langsung	58
Gambar 5.2. Penggolongan pengukuran secara tidak langsung	58
Gambar 5.3. Daerah pengukuran berbagai jenis manometer	59
Gambar 5.4. Manometer Bourdon	60
Gambar 5.5. Manometer McLeod	61
Gambar 5.6. Hubungan kehilangan panas sebagai fungsi tekanan	63
Gambar 5.7. Hubungan perpindahan panas sebagai fungsi tekanan	64
Gambar 5.8. Rangkaian sensor manometer pirani	65
Gambar 5.9. Rangkaian sensor manometer <i>convectron</i>	66
Gambar 5.10. Manometer ionisasi katode panas	67
Gambar 5.11. Proses ionisasi pada manometer ionisasi	67
Gambar 5.12. Tampang lintang manometer penning	69
Gambar 5.13. Skema manometer Penning	69
Gambar 6.1. Instalasi pompa rotari dan pompa difusi	71
Gambar 6.2. Instalasi pompa rotari dan pompa kriogenik	72
Gambar 6.3. Skema beban gas dalam sistem vakum	73
Gambar 6.4. Sambungan dengan perapat logam dan viton	74
Gambar 6.5. Laju pelepasan gas sebagai fungsi waktu	78
Gambar 6.6. Proses terjadinya permeasi	80
Gambar 6.7. Hubungan koefisien difusi sebagai fungsi temperatur untuk SS 309 S	81
Gambar 6.8. Hubungan konstanta permeasi sebagai fungsi temperatur untuk SS 309 S	82
Gambar 6.9. Penurunan tekanan sebagai fungsi waktu pemompaan	83
Gambar 6.10. Instalasi sistem vakum mesin berkas elektron	85
Gambar 6.11. Perakitan corong pemayar dengan sistem vakum	91
Gambar 6.12. Hubungan kehampaan sebagai fungsi waktu pemompaan dengan pompa difusi RD 150	96
Gambar 7.1. Katup dengan standar KF (perapat <i>O-ring</i>)	98
Gambar 7.2. Katup pneumatik dengan standar KF (perapat <i>O-ring</i>)	99
Gambar 7.3. Katup gerbang (<i>gate valve</i>) pneumatic	99
Gambar 7.4. Detil katup gerbang (<i>gate valve</i>)	100
Gambar 7.5. Standar NW (KF) untuk sambungan dengan perapat <i>O-ring</i>	101
Gambar 7.6. Standar DN (CF) untuk sambungan dengan perapat viton	101

Gambar 7.7. Standar <i>O-ring</i> dan <i>centering ring</i>	101
Gambar 7.8. Standar perapat <i>O-ring</i> dan <i>trapped O-ring</i>	102
Gambar 7.9. Standar klem	102
Gambar 7.10. Standar alur <i>O-ring</i>	102
Gambar 7.11. Standar perapat logam (tembaga)	103
Gambar 7.12. Standar persilangan (<i>reducing cross</i>)	103
Gambar 7.13. Standar sambungan menggunakan <i>O-ring</i>	104
Gambar 7.14. Standar sambungan menggunakan <i>conflat (CF)</i>	105
Gambar 7.15. Pengelasan yang direkomendasikan dalam teknik vakum	106

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Rentang tingkat kevakuman menurut Alexander Roth dan Dorothy M. Hoffman	3
Tabel 1.2.	Rentang tingkat kevakuman menurut John F. O'Hanlon	4
Tabel 2.1.	Hubungan berbagai macam satuan (konversi) tekanan	9
Tabel 2.2.	Hubungan kevakuman dengan kerapatan gas	9
Tabel 2.3.	Hubungan tekanan (P) dengan kerapatan molekul (n), laju tumbukan molekul (ϕ) dan lintasan bebas rerata (λ)	10
Tabel 2.4.	Komposisi udara atmosfer	14
Tabel 2.5.	Nilai lintasan bebas rata-rata berbagai jenis gas	17
Tabel 3.1.	Klasifikasi aliran gas pada tekanan rendah	19
Tabel 3.2.	Faktor koreksi penampang segi empat untuk persamaan (3.6)	23
Tabel 3.3.	Faktor koreksi penampang segi empat untuk persamaan (3.10)	24
Tabel 3.4.	Faktor koreksi penampang segi empat untuk persamaan (3.16)	26
Tabel 4.1.	Jenis-jenis minyak difusi	49
Tabel 5.1.	Faktor koreksi manometer perpindahan energi	70
Tabel 5.2.	Faktor koreksi manometer ionisasi	70
Tabel 6.1.	Koefisien difusi (D_1) gas hidrogen dalam SS 309 S	80
Tabel 6.2.	Konstanta permeasi ($D_1 b = K$) gas hidrogen pada SS 309 S	81
Tabel 6.3.	Rangkuman hasil perhitungan beban gas yang dipompa	89

Simbol

P	tekanan
V	volume, volume gas akibat penguapan
T	temperatur absolut gas (mutlak)
P_{abs}	tekanan absolut
P_t	tekanan total
P_p	tekanan parsial
P_s	tekanan uap jenuh
P_n	tekanan standar/normal
P_w	tekanan kerja
P_u	tekanan akhir (kevakuman yang dapat dicapai)
F	gaya
A	luas permukaan
N	jumlah molekul/atom
n	jumlah molekul/atom tiap satuan volume (kerapatan molekul/atom)
k	konstanta Boltzmann
λ	lintasan bebas rata-rata
ξ	diameter molekul/atom, konstanta waktu difusi
m	massa molekul/atom
v	kecepatan molekul/atom, kecepatan aliran gas
L	panjang lintasan, panjang saluran
ρ	rapat jenis gas
D	diameter pipa
η	viskositas gas
Q	laju aliran gas
M	berat molekul
R_o	konstanta gas universal
D	diameter saluran dalam instalasi sistem vakum
Re	bilangan Reynold
Kn	bilangan Knudsen
C	daya hantar saluran
R	jari-jari penampang pipa
l	sisi panjang penampang segi empat

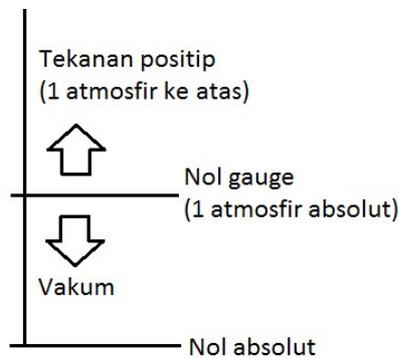
w	sisi pendek penampang segi empat
Y	faktor koreksi
\bar{P}	tekanan rata-rata di dalam saluran
η	viskositas gas
B	keliling dari penampang aliran
S	laju pemompaan
S_{ef}	laju pemompaan efektif
S_p	laju pemompaan pompa
C	daya hantar
Q_L	gas yang masuk karena adanya kebocoran
Q_D	gas yang disebabkan adanya pelepasan gas (<i>outgassing</i>)
Q_V	gas yang disebabkan adanya penguapan
Q_P	gas yang masuk dengan cara permeasi melalui dinding
Q_G	jumlah gas sebagai beban pompa
K_h	laju pelepasan gas spesifik pada h jam setelah pompa dioperasikan
K_1	laju pelepasan gas spesifik setelah pompa dioperasikan selama 1 jam
t_h	waktu setelah pompa dioperasikan
γ	konstanta yang berkaitan dengan bahan
D_1	koefisien difusi
ε_0	konsentrasi gas ketika $t_h = 0$
$D_1 b$	konstanta permeasi
h	tebal dinding
P_o	tekanan parsial gas di bagian luar dinding
W	jumlah bahan yang menguap
P_v	tekanan penguapan
M	berat molekul
f	koefisien <i>sticking</i>
N_A	bilangan avogadro
D_1	koefisien difusi
b	konstanta kelarutan
j	konstanta desosiasi
K	konstanta permeasi
K_h	laju pelepasan gas spesifik pada h jam setelah pompa dioperasikan
K_1	laju pelepasan gas spesifik setelah pompa dioperasikan selama 1 jam
t_h	waktu setelah pompa dioperasikan
γ	konstanta yang berkaitan dengan bahan

t	waktu yang diperlukan untuk memvakumkan
P_i	tekanan awal
P	tekanan yang dicapai pada waktu (t)
ϕ	fluks tumbukan molekul

I. PENDAHULUAN

1. Sejarah dan Pengertian Vakum

Kata "vakum" berasal dari bahasa Latin "vacuo", yang berarti "kosong". Dalam prakteknya, tidak ada ruang yang benar-benar kosong di alam ini atau tidak ada kondisi vakum sempurna (ideal). Dengan demikian, 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. Gambar 1.1 menunjukkan daerah tekanan positif yaitu daerah tekanan 1 (satu) atmosfer ke atas dan daerah vakum yaitu daerah tekanan di bawah tekanan atmosfer hingga mencapai nol absolut atau tekanan negatif jika didasarkan 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 .



Gambar 1.1. Daerah tekanan positif dan daerah vakum.

Sejak masa sebelum masehi (SM) para ilmuwan telah melakukan penelitian tentang vakum. Demokritos, ilmuwan Yunani (sekitar 460-370 SM), salah satu idenya membahas konsep vakum dan berspekulasi apakah mungkin

dapat mengosongkan ruangan (memvakumkan) hingga mencapai betul-betul kosong. Dari pembahasan tersebut beliau meragukan dan bahkan menyimpulkan bahwa tidak mungkin dapat mengosongkan ruangan hingga betul-betul kosong (vakum absolut) [1].

Pada abad ke-17, ilmu fisika dan teknologi vakum lahir. Galileo (1564-1642) adalah orang pertama kali melakukan eksperimen mencoba untuk mengukur gaya yang diperlukan untuk menghasilkan vakum dengan piston di dalam silinder. Selanjutnya Torricelli (1608-1647), teman sejawat dari Galileo, pada tahun 1644 berhasil melakukan eksperimen vakum dengan tabung kaca yang diisi dengan air raksa dan ditutup pada salah satu ujung sedang ujung lainnya terbuka di kolam air raksa. Berdasarkan eksperimen ini dihasilkan bahwa kolom air raksa selalu pada ketinggian 760 mm tidak tergantung dari panjang, bentuk atau derajat kemiringan tabung [1]. Metode ini (eksperimen) merupakan pengukuran tekanan udara atmosfer dan merupakan eksperimen vakum yang dihasilkan pertama kali.

Eksperimen lain dilakukan oleh ilmuwan Perancis yaitu Blaise Pascal (1623-1662), berdasarkan yang ditemukan oleh Torricelli memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman tentang fisika vakum sehingga banyak menghasilkan penemuan penting lainnya dalam fisika. Dari eksperimen ini ditemukan satuan tingkat kevakuman yang digunakan sebagai standar internasional (SI) untuk satuan tekanan dan sekaligus untuk menghormati Torricelli dan Pascal yaitu [1]

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

Penemuan penting berikutnya adalah yang ditemukan oleh Robert Boyle (1627-1691) dan Edme Mariotte (1620-1684). Mereka menemukan hukum dasar untuk gas ideal yang disebut hukum Boyle-Mariotte yaitu

$$\frac{P \cdot V}{T} = \text{konstan} \quad (1)$$

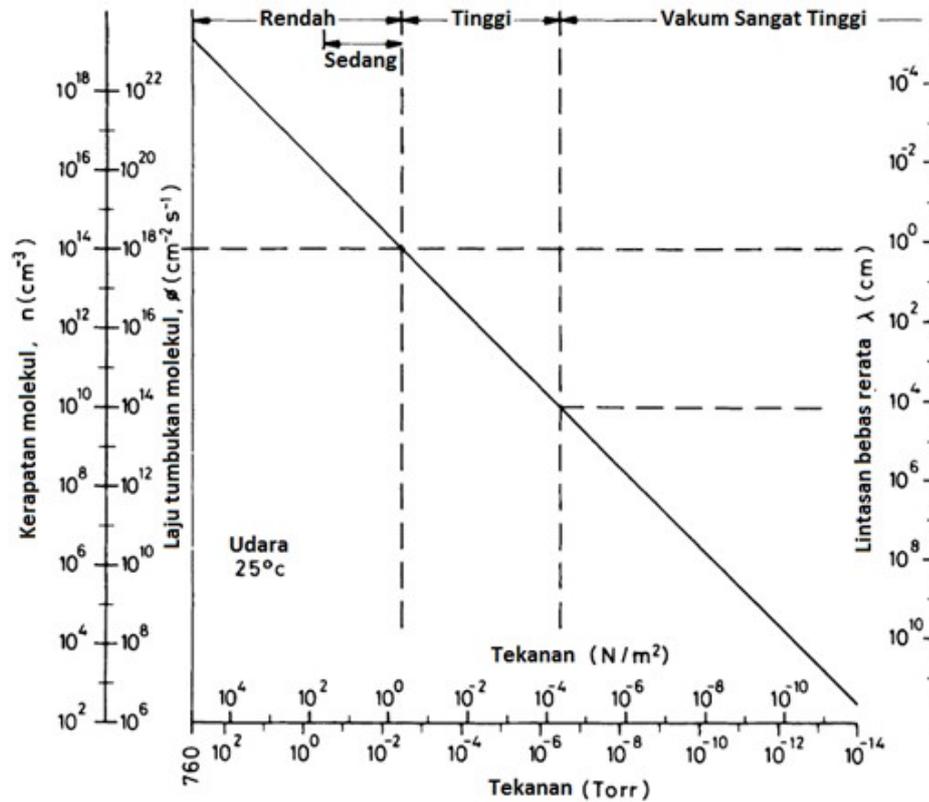
dengan P tekanan, V volume dan T temperatur absolut gas.

Untuk memahami permasalahan terkait dengan kevakuman (tekanan di bawah atmosfer) perlu dipelajari hubungan antara kerapatan molekul, laju tumbukan molekul, lintasan bebas rerata yang berkaitan dengan kevakuman

(tekanan di bawah atmosfer). Kerapatan molekul sangat berhubungan (berbanding lurus) dengan tekanan. Tekanan atmosfer dipengaruhi oleh temperatur dan ketinggian dari permukaan air laut. Pada Gambar 1.2 ditunjukkan hubungan kerapatan molekul dan lintasan bebas rerata sebagai fungsi tingkat kevakuman atau tekanan (Torr), sedangkan pada Gambar 1.3 ditunjukkan hubungan tekanan (kevakuman) dan konsentrasi partikel sebagai fungsi ketinggian dari permukaan air laut. Berdasarkan Gambar 1.2 dapat diketahui bahwa pada kevakuman rendah (tekanan mendekati atmosfer) maka kerapatan dan laju tumbukan molekul besar serta lintasan bebas rerata makin pendek, sedangkan makin tinggi tingkat kevakuman (tekanan makin rendah) maka kerapatan dan tumbukan molekul makin rendah serta lintasan bebas rerata makin panjang. Berdasarkan Gambar 1.3 dapat diketahui hubungan konsentrasi partikel dan tekanan sebagai fungsi ketinggian dari permukaan air laut. Pada ketinggian sekitar 90 km dari permukaan air laut, besarnya tekanan sekitar 10^{-3} Torr. Untuk ketinggian mulai sekitar 100 km dari permukaan air laut, konsentrasi partikel dan tekanan (kevakuman) dipengaruhi kondisi cahaya matahari. Rentang tingkat kevakuman menurut Alexander Roth dan Dorothy M. Hoffman dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu [2], [3]: vakum rendah dan sedang, vakum tinggi, serta vakum sangat tinggi, sedangkan menurut John F. O'Hanlon [4] dibagi menjadi 6 (enam) yaitu: vakum rendah, vakum sedang, vakum tinggi, vakum sangat tinggi (*very high vacuum*), vakum ultra tinggi (*ultra high vacuum*), vakum ekstrim ultra tinggi (*extreme ultra high vacuum*). Rentang tingkat kevakuman ini ditunjukkan pada Tabel 1.1 dan Tabel 1.2.

Tabel 1.1. Rentang tingkat kevakuman menurut Alexander Roth dan Dorothy M. Hoffman [2], [3].

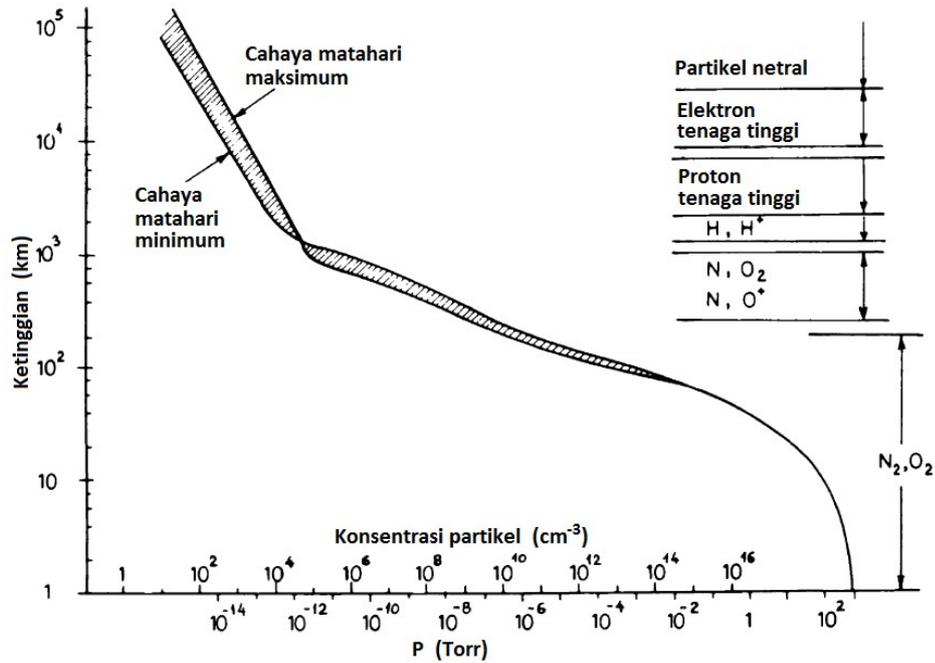
No	Tingkat Kevakuman	Rentang Kevakuman (Torr)
1	Rendah dan sedang Sedang	$760 - 10^{-2}$ $10^0 - 10^{-2}$
2	Tinggi	$10^{-3} - 10^{-7}$
3	Sangat tinggi	$10^{-7} - 10^{-16}$



Gambar 1.2. Hubungan rapat molekul dan lintasan bebas rerata sebagai fungsi kevakuman atau tekanan (Torr) [2].

Tabel 1.2. Rentang tingkat kevakuman menurut John F. O’Hanlon [4].

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>extreme ultra high</i>)	$10^{-10} \geq P$



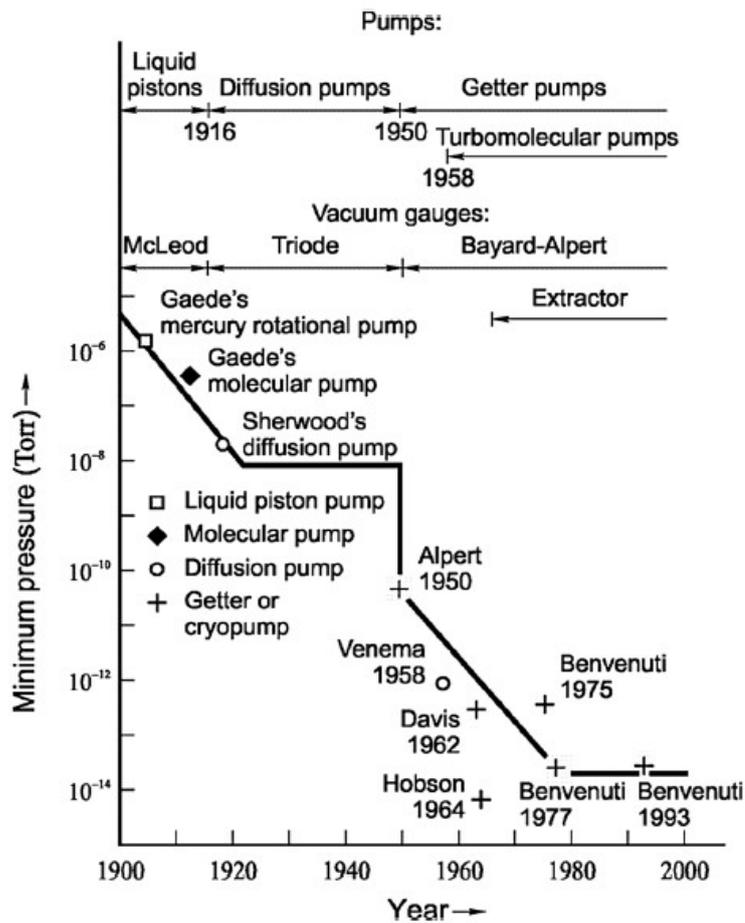
Gambar 1.3. Hubungan ketinggian sebagai fungsi kevakuman [2].

Pengertian-pengertian yang berhubungan dengan kevakuman yang ditunjukkan pada Gambar 1.2 dan Gambar 1.3 adalah tentang:

- Kerapatan molekul yaitu jumlah rerata dari molekul tiap satuan volume (misalnya: molekul/cm³, molekul/m³).
- Laju tumbukan molekul yaitu jumlah molekul yang menumbuk permukaan tiap satuan luas dan waktu (molekul/(cm² detik)), laju tumbukan ini sangat menentukan tekanan yang terukur.
- Lintasan bebas rerata yaitu jarak gerak rerata molekul tanpa terjadi tumbukan baik antar molekul maupun molekul dengan permukaan benda di dalam ruang.

Dengan perkembangan ilmu pengetahuan selanjutnya banyak ditemukan berbagai hal karena keberhasilan tingkat kevakuman misalnya penemuan elektron pada tahun 1897 oleh J.J. Thomson (1856-1940) dan penemuan sinar-X oleh Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923). Akhirnya pada tahun 1930-an ditemukan berbagai jenis akselerator partikel yang banyak dibangun hingga sampai saat ini, dan semua memerlukan vakum.

Pengembangan berikutnya adalah berkaitan dengan kepentingan dalam penelitian ruang angkasa maupun pengembangan teknologi terkait dengan vakum sangat tinggi (*Ultra High Vacuum/UHV*). Pada pengembangan tersebut yaitu dengan menciptakan jenis-jenis pompa vakum dan alat ukurnya yang rangkuman secara garis besar ditunjukkan pada Gambar 1.4. Dari hasil pengembangan tersebut, untuk mencapai kevakuman sangat tinggi awalnya menggunakan pompa difusi. Namun dengan perkembangan teknologi telah diciptakan jenis pompa baru yang lebih bersih yaitu jenis pompa turbomolekular dan pompa ionik, sehingga banyak penggunaan pompa difusi diganti dengan pompa turbomolekular.



Gambar 1.4. Perkembangan teknik vakum [1].

2. Aplikasi Teknik Vakum

Teknik vakum banyak dimanfaatkan untuk memfasilitasi penelitian, pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi maupun untuk keperluan industri. Penelitian-penelitian yang membutuhkan teknik vakum misalnya penelitian terkait dengan lapisan tipis yang dilakukan dengan metode evaporasi (*evaporation*), deposisi uap kimia (*chemical vapor deposition/CVD*) maupun deposisi uap fisika (*physical vapor deposition/PVD*). Untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi misalnya penggunaan untuk pengembangan teknologi akselerator baik untuk penelitian, kesehatan (terapi) maupun untuk industri. Jenis-jenis akselerator ini cukup banyak misalnya mesin berkas elektron, akselerator linier, rhodotron, mikrotron, siklotron, sinkrosiklotron maupun implantor ion.

Contoh jenis akselerator untuk penelitian misalnya: implantor ion, generator neutron, akselerator Van De Graft maupun sinkrotron. Adapun contoh akselerator untuk kesehatan adalah akselerator linier untuk terapi kanker (kemoterapi). Untuk kebutuhan diagnostik, jenis akselerator yang banyak digunakan adalah siklotron yaitu untuk memproduksi radioisotop yang digunakan untuk diagnostik sel kanker. Khusus untuk industri, teknik vakum diperlukan pada industri mulai dari industri untuk keperluan rumah tangga sampai industri canggih yang digunakan untuk terapi dan diagnostik di rumah sakit. Industri untuk keperluan rumah tangga misalnya termos (untuk menyimpan air panas), lampu pijar dan lampu neon. Penggunaan teknik vakum pada termos yaitu untuk memvakumkan ruang antara dinding dalam yang bersinggungan dengan air panas dan dinding luar yang bersinggungan dengan udara atmosfer.

Pada termos pemvakuman digunakan untuk mengisolasi panas agar laju penjalaran panas sangat rendah sehingga air di dalam termos tetap panas. Untuk lampu pijar pemvakuman digunakan agar kawat filamen pijar (wolfram) tidak menjadi oksida wolfram yang mempunyai titik leleh jauh lebih rendah dibanding wolfram yaitu 1473 °C [5], sedangkan titik leleh wolfram 3422 °C [6]. Dengan demikian filamen pijar (wolfram) tidak langsung meleleh dan putus saat lampu dihidupkan. Penggunaan teknik vakum pada industri lampu neon, pemvakuman digunakan saat pengisian gas neon untuk menjaga tingkat kemurniannya dan pengisian gas hanya beberapa milibar (di bawah tekanan atmosfer). Penggunaan teknik vakum untuk industri canggih misalnya pada

akselerator untuk terapi dan diagnostik di rumah sakit serta untuk peralatan iradiator baik rempah-rempah maupun industri ban. Peralatan-peralatan ini misalnya pesawat sinar-X (untuk diagnostik), mesin berkas elektron untuk pembuatan ikatan silang pada industri ban mobil, rodhotron dan akselerator linear untuk sterilisasi peralatan kedokteran dan pengawetan rempah-rempah serta siklotron untuk produksi radioisotop misalnya F-18 yang digunakan pada teknik diagnosis PET (*positron emission tomography*). Penggunaan teknologi vakum pada akselerator adalah untuk memvakumkan ruangan di dalam peralatan tersebut hingga mencapai kevakuman sangat tinggi, agar partikel yang dipercepat (ion maupun elektron) tidak mengalami hambatan yang berarti mencapai target.

BAB II. DASAR-DASAR TEKNOLOGI VAKUM

2.1. Tekanan

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 (P_{abs}), tekanan total (P_t), tekanan parsial (P_p), tekanan uap jenuh (P_s), tekanan standar/normal (P_n) dan tekanan kerja (P_w).

Satuan Dalam Teknik Vakum

Untuk memberikan besaran suatu kevakuman atau kehampaan dinyatakan dalam tekanan. Satuan yang lazim digunakan adalah Torr (mmHg), Pa (N/m^2) dan mbar. Hubungan berbagai macam satuan (konversi satuan) tekanan yang digunakan dalam teknik vakum ditunjukkan pada Tabel 2.1. Tingkat kevakuman sangat berhubungan dengan kerapatan gas (atom/molekul). Hubungan tingkat kevakuman dengan kerapatan gas di dalam ruang vakum ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.1. Hubungan berbagai macam satuan (konversi) tekanan [2].

	Torr	kg/cm ²	atm	psi	Pascal	mbar
Torr	1	$1,36 \times 10^{-3}$	$1,315 \times 10^{-3}$	0,01934	133,33	1,333
kg/cm ²	735	1	0,968	14,22	$0,980 \times 10^{-5}$	980
Atm	760	1.033	1	14,70	$1,013 \times 10^{-5}$	1.013
Psi	51,75	0,0703	0,068	1	6895	68,95
Pascal	$0,75 \times 10^{-2}$	$1,02 \times 10^{-5}$	$0,987 \times 10^{-5}$	$0,145 \times 10^{-3}$	1	10^{-2}
mbar	0,750	$1,02 \times 10^{-3}$	$0,987 \times 10^{-3}$	$0,145 \times 10^{-1}$	100	1

Tabel 2.2. Hubungan kevakuman dengan kerapatan gas [2].

Tekanan dalam Torr	Jumlah molekul-molekul per cm ³
760 – 1	$10^{19} - 10^{16}$
$1 - 10^{-3}$	$10^{16} - 10^{13}$
$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{13} - 10^9$
$10^{-7} - 10^{-11}$	$10^9 - 10^5$

Hubungan tekanan (P) dengan kerapatan molekul (n), fluks tumbukan molekul (ϕ) dan lintasan bebas rerata (λ) selain ditunjukkan pada Gambar 1.4 juga ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Hubungan tekanan dengan kerapatan molekul, laju tumbukan molekul dan lintasan bebas rerata [2].

P (Torr)	n (molekul/cm ³)	ϕ (tumbukan/cm ² detik)	λ (cm)
760	$2,46 \times 10^{19}$	$2,88 \times 10^{23}$	$6,7 \times 10^{-6}$
1	$3,25 \times 10^{16}$	$3,78 \times 10^{20}$	$5,1 \times 10^{-3}$
10^{-3}	$3,25 \times 10^{13}$	$3,78 \times 10^{17}$	5,1
10^{-6}	$3,25 \times 10^{10}$	$3,78 \times 10^{14}$	$5,1 \times 10^3$
10^{-9}	$3,25 \times 10^7$	$3,78 \times 10^{11}$	$5,1 \times 10^6$
10^{-12}	$3,25 \times 10^4$	$3,78 \times 10^8$	$5,1 \times 10^9$
10^{-15}	$3,25 \times 10$	$3,78 \times 10^5$	$5,1 \times 10^{12}$

Tekanan absolut (P_{abs})

Tekanan absolut ditentukan berdasarkan tekanan mutlak. Karena didasarkan pada tekanan mutlak maka untuk tekanan atmosfer dinyatakan 1 atmosfer (absolut) atau 0 atmosfer (*gauge*). Di dalam teknologi vakum selalu didasarkan atau ditentukan pada tekanan absolut sehingga indeks "absolut" biasanya diabaikan atau tidak ditulis.

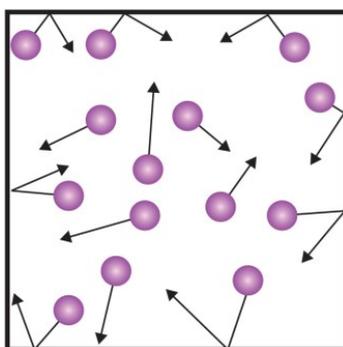
Tekanan total (P_t)

Tekanan total suatu gas di dalam bejana (*vesse/*) 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. Tekanan parsial suatu gas adalah perkalian momentum dengan jumlah partikel gas tiap-tiap jenis gas. Jadi besar tekanan parsial sangat tergantung dari prosentase komposisi dari jenis gas tersebut. Jumlah tekanan parsial dari masing-masing jenis gas yang ada di dalam bejana akan sama dengan tekanan total gas tersebut. Jika gas di dalam bejana satu jenis maka molekul/atom di dalam bejana juga satu jenis sehingga tekanan total sama dengan tekanan dari gas tersebut yang

diilustrasikan pada Gambar 2.1. Dalam pengukuran tekanan positip (di atas tekanan atmosfer) yang terukur adalah tekanan total (P_t) dan biasanya didasarkan 0 (nol) atmosfer atau *gauge* (terukur). Besar tekanan atmosfer pada kondisi standar adalah 76 cmHg atau 760 mmHg atau 760 Torr.

Tekanan parsial (P_p)

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. Besar momentum yang ditransmisikan sangat tergantung dari kecepatan dan massa molekul tiap-tiap jenis gas.

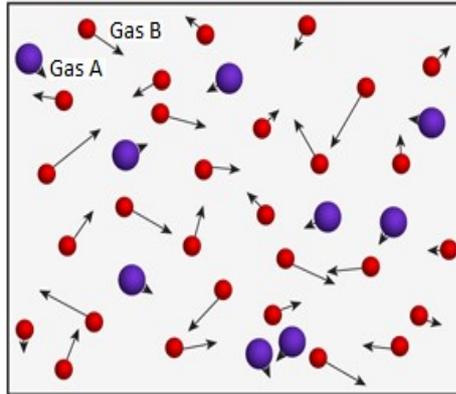


Gambar 2.1. Gerakan acak molekul/atom untuk 1 (satu) jenis gas [7].

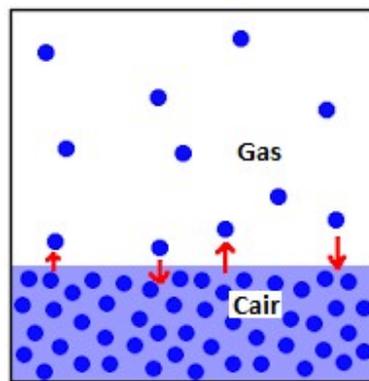
Tekanan parsial suatu gas adalah perkalian momentum dengan jumlah partikel tiap-tiap jenis gas. Jadi besar tekanan parsial sangat tergantung dari prosentase komposisi dari jenis gas tersebut. Gambar 2.2 mengilustrasikan gerakan molekul/atom untuk 2 (dua) jenis gas yang menyebabkan terjadinya tekanan pada dinding bejana. Jumlah tekanan parsial dari masing-masing jenis gas yang ada di dalam bejana akan sama dengan tekanan total gas tersebut.

Tekanan jenuh (P_s)

Tekanan jenuh suatu gas adalah jika gas tersebut ditekan pada temperatur tetap maka tidak terjadi penambahan tekanan melainkan terjadi kondensasi (pengembunan) sehingga berubah menjadi cairan yang diilustrasikan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2. Gerakan molekul/atom untuk 2 (dua) jenis gas [8].



Gambar 2.3. Tekanan jenuh (gas dan cairan) [9].

Tekanan standar atau tekanan normal (P_n)

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

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. Tingkat kebersihan permukaan akan memberikan sumbangan beban gas khususnya terkait dengan gas yang dihasilkan oleh penguapan kotoran dari permukaan.

Untuk semua gas di dalam ruang tertutup maka partikel-partikel gas tersebut akan terdistribusi secara merata. Masing-masing partikel gas tersebut bergerak secara acak sesuai dengan energinya. Selanjutnya akan saling betumbukan dan juga akan menumbuk dinding ruangan sehingga menimbulkan gaya F pada permukaan A akibat momentum yang ditransmisikan pada permukaan. Tekanan P yang diberikan pada dinding didefinisikan sebagai

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

dengan P tekanan (N/m^2), F gaya (N) dan A luas permukaan (m^2). Tekanan (P) ini adalah tekanan total yang biasanya ditunjukkan pada saat pengukuran menggunakan alat ukur tekanan. Jika gas terdiri dari berbagai jenis partikel maka untuk masing-masing partikel gas akan memberikan tekanan berbanding lurus dengan konsentrasinya yang disebut tekanan parsial. Jumlah semua tekanan parsial dari masing-masing partikel gas tersebut adalah sama dengan tekanan total. Sebagai contoh, udara atmosfer yang terdiri dari beberapa jenis gas atau beberapa unsur dari gas. Selain unsur utama nitrogen (N_2), oksigen (O_2) dan uap air (H_2O), udara juga mengandung berbagai unsur gas lainnya yaitu: argon (Ar), karbon dioksida (CO_2), karbon monoksida (CO), neon (Ne), helium (He), krypton (Kr), hidrogen (H_2), xenon (Xe), metane (CH_4), ozon (O_3) dan nitrous oksida (N_2O). Komposisi unsur-unsur gas di dalam udara standar ditunjukkan pada Tabel 2.4.

2.2. Hukum-hukum Gas

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.

Tabel 2.4. Komposisi udara atmosfer [2].

Unsur gas	Kondisi atmosfer ^(*)		Ultra vakum tinggi	
	volume (%)	Tekanan parsial (Torr)	Tekanan parsial (Torr) (**)	Tekanan parsial (Torr) (***)
N ₂	78,08	$5,95 \times 10^2$	2×10^{-11}	---
O ₂	20,95	$1,59 \times 10^2$	---	3×10^{-13}
Ar	0,93	7,05	6×10^{-12}	---
CO ₂	0,033	$2,5 \times 10^{-1}$	$6,5 \times 10^{-11}$	6×10^{-12}
Ne	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-11}$	---
He	$5,24 \times 10^{-4}$	4×10^{-3}	$3,6 \times 10^{-1}$	---
Kr	$1,1 \times 10^{-4}$	$8,4 \times 10^{-4}$	---	---
H ₂	5×10^{-5}	$3,8 \times 10^{-4}$	$1,79 \times 10^{-9}$	2×10^{-11}
Xe	$8,7 \times 10^{-6}$	$6,6 \times 10^{-5}$	---	---
H ₂ O	1,57	$1,19 \times 10^1$	$1,25 \times 10^{-10}$	9×10^{-13}
CH ₄	2×10^{-4}	$1,5 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-11}$	3×10^{-13}
O ₃	7×10^{-6}	$5,3 \times 10^{-5}$	---	---
N ₂ O	5×10^{-5}	$3,8 \times 10^{-4}$	---	---
CO	---	---	$1,4 \times 10^{-10}$	9×10^{-12}

Keterangan:

(*) Norton (1962) p. 11, (**) Dennis and Heppel (1968) p. 105, (***) Singleton (1966) p. 355.

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

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \text{ (} N \text{ dan } T \text{ konstan)} \quad (2.2)$$

$$N = n \cdot V \quad (2.2a)$$

dengan P tekanan, V volume, N jumlah molekul/atom di dalam bejana, n jumlah molekul/atom tiap satuan volume dan T temperatur mutlak.

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

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (N \text{ dan } V \text{ konstan}). \quad (2.3)$$

Hukum Charles

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

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (N \text{ dan } P \text{ konstan}). \quad (2.4)$$

Hukum Dalton

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

$$P = nkT \quad (2.5)$$

dengan k adalah konstanta Boltzmann yang nilainya = $1,3804 \times 10^{-23}$ J/K.

Jika di dalam bejana terdiri dari beberapa jenis gas maka,

$$P_t = n_1 k T + n_2 k T + n_3 k T + \dots \quad (2.5a)$$

dan

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad (2.5b)$$

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

$$\frac{P_1}{N_1} = \frac{P_2}{N_2} \quad (T \text{ dan } V \text{ konstan}). \quad (2.6)$$

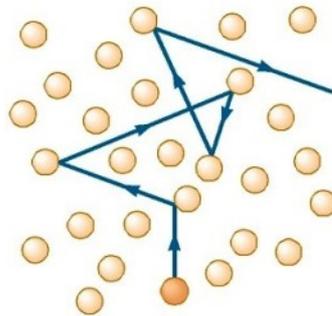
2.3. Lintasan Bebas Rata-rata

Distribusi molekul/atom gas adalah tertata secara acak dan masing-masing mempunyai gerakan dengan kecepatan dan jarak yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa masing-masing molekul/atom saat bergerak dengan menempuh jarak lurus yang berbeda-beda. Gerakan dengan jarak tempuh lurus sebelum bertumbukan dengan molekul/atom lain disebut lintasan bebas, gerakan ini diilustrasikan pada Gambar 2.4. Jarak lintasan bebas untuk masing-masing molekul/atom belum tentu sama, maka jarak lintasan rata-ratanya disebut lintasan bebas rata-rata (λ). Berdasarkan teori kinetika, lintasan bebas rata-rata (λ) dapat ditentukan dengan persamaan [2]

$$\lambda = \frac{k T}{\sqrt{2} \pi \xi^2 P} \quad (2.7)$$

dengan ξ adalah diameter molekul/atom. Untuk nilai lintasan bebas rata-rata berbagai jenis gas ditunjukkan pada Tabel 2.5, sedangkan besar tekanan menurut persamaan (2.5) adalah $P = nkT$ atau $n = \frac{P}{kT}$ sehingga jika disubsitusikan ke dalam persamaan (2.7) didapatkan

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi n \xi^2}. \quad (2.8)$$



Gambar 2.4. Lintasan bebas molekul/atom [10].

Tabel 2.5. Nilai lintasan bebas rata-rata berbagai jenis gas [2].

Gas	Rumus Kimia	ξ (cm)	λ (cm) ^{*)}
Helium	He	$2,61 \times 10^{-8}$	$9,26 \times 10^{-3}$
Neon	Ne	$2,38 \times 10^{-8}$	$1,03 \times 10^{-2}$
Argon	Ar	$2,94 \times 10^{-8}$	$7,34 \times 10^{-3}$
Krypton	Kr	$3,16 \times 10^{-8}$	$6,38 \times 10^{-3}$
Xenon	Xe	$3,43 \times 10^{-8}$	$5,40 \times 10^{-3}$
Hidrogen	H ₂	$2,76 \times 10^{-8}$	$8,33 \times 10^{-3}$
Nitrogen	N ₂	$3,14 \times 10^{-8}$	$5,40 \times 10^{-3}$
Oksigen	O ₂	$2,93 \times 10^{-8}$	$8,33 \times 10^{-2}$
Air Raksa	Hg	$2,38 \times 10^{-8}$	$1,12 \times 10^{-2}$
Amonia	NH ₃	$3,09 \times 10^{-8}$	$6,68 \times 10^{-3}$
Karbon monoksida	CO	$3,16 \times 10^{-8}$	$6,36 \times 10^{-3}$
Karbon dioksida	CO ₂	$3,22 \times 10^{-8}$	$6,13 \times 10^{-3}$
Asetilin	C ₂ H ₂	$3,44 \times 10^{-8}$	$5,38 \times 10^{-3}$

Keterangan:

*) lintasan bebas rata-rata pada $P = 1$ Torr dan $T = 273$ K

2.4. Gerakan Molekul Gas

Molekul-molekul/atom-atom gas jika mempunyai temperatur di atas 0 K akan selalu bergerak dengan gerakan acak. Tenaga gerak ini berupa tenaga kinetik yang dimiliki oleh molekul/atom, yang menunjukkan temperaturnya. Berdasarkan hukum Newton II, gaya (F) adalah perubahan momentum terhadap waktu

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Perubahan momentum molekul/atom yang bertumbukan (Δmv_x) untuk arah sumbu x adalah

$$\Delta(mv) = m v_x - m(-v_x) = 2m v_x \quad (2.10)$$

maka

$$F = \frac{2 m v_x}{2L/v_x} = \frac{m v_x^2}{L} \quad (2.11)$$

dengan F adalah gaya yang ditimbulkan oleh molekul/atom, m massa molekul/atom, v_x kecepatan molekul/atom, L panjang lintasan arah sumbu x .

Tekanan rata-rata yang terjadi pada permukaan pada arah sumbu x adalah

$$P_x = \frac{F}{A} = \frac{m v_x^2}{AL} = \frac{m v_x^2}{V}, \quad (2.12)$$

untuk N adalah jumlah molekul/atom di dalam volume ruang V dan jumlah molekul/atom tiap satuan volume adalah $n = \frac{N}{V}$, maka tekanan rata-rata pada arah sumbu x yang diakibatkan oleh sejumlah molekul/atom N adalah

$$P_x = \frac{N}{V} m \overline{v_x^2} = nm \overline{v_x^2}. \quad (2.13)$$

dengan $\overline{v_x^2}$ adalah kecepatan rata-rata dari v_x^2 untuk n molekul/atom. Tekanan di dalam ruangan terdistribusi secara merata baik ke arah sumbu x , sumbu y maupun sumbu z sehingga

$$P = P_x = P_y = P_z = nm \overline{v_x^2}. \quad (2.14)$$

Menurut teorema Pythagoras

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2} = 3\overline{v_x^2} = 3\overline{v_y^2} = 3\overline{v_z^2} \quad (2.15a)$$

atau

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}. \quad (2.15b)$$

Dari persamaan (2.5), (2.13) dan (2.14b) diperoleh

$$P = n k T = \frac{1}{3} nm \overline{v^2} \quad (2.16)$$

sehingga

$$\overline{v^2} = \frac{3 kT}{m}. \quad (2.17)$$

Besar energi kinetik rata-rata molekul adalah $\bar{E} = \frac{1}{2} m \overline{v^2}$ maka diperoleh besar energi kinetik rata-rata (\bar{E}) adalah

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (2.18)$$

BAB III. ALIRAN GAS DALAM TEKNIK VAKUM

3.1. Klasifikasi Aliran Dalam Teknik Vakum

Aliran dalam teknik vakum sangat penting untuk dipelajari karena sangat menentukan laju pemvakuman, kebutuhan pompa vakum, komponen vakum khususnya komponen-komponen yang menghubungkan bejana yang divakumkan dengan pompa vakum. Laju pemvakuman 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 laminer 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 laminer atau turbulen ditentukan oleh bilangan Reynold R_e (Tabel 3.1), 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 3.1.

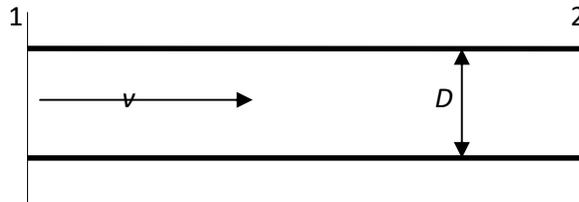
Tabel 3.1. Klasifikasi aliran gas pada tekanan rendah [2].

Kondisi Gas	Jenis Aliran	Batasan
Kental (<i>viscous</i>)	Laminer	$R_e < 1100$
	Turbulen	$R_e > 2100$ $D/\lambda > 110$
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 pada Gambar 3.1, maka besar nilai bilangan Reynold's R_e dapat ditentukan dengan persamaan

$$R_e = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (3.1)$$

dengan ρ adalah rapat jenis gas (g/cm^3), v kecepatan aliran gas (cm/detik), D diameter pipa (cm) dan η viskositas gas (poise).



Gambar 3.1. Aliran dalam sistem vakum.

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

$$Q = \rho v \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \quad (3.2)$$

maka kecepatan aliran (v) adalah

$$v = \frac{4 Q}{\pi \rho D^2} \quad (3.2a)$$

sedangkan rapat jenis gas (ρ) adalah

$$\rho = \frac{M P}{R_0 T}. \quad (3.2b)$$

Jika disubstitusikan ke dalam persamaan (3.1) didapatkan

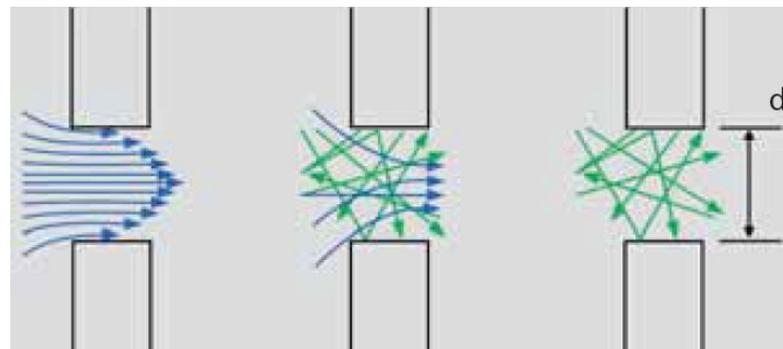
$$R_e = \frac{4 M Q}{\pi R_0 T \eta D}. \quad (3.3)$$

dengan M adalah berat molekul, R_0 konstanta gas universal, T temperatur mutlak dan D diameter saluran dalam instalasi sistem vakum. Bilangan *Knudsen* (K_n) adalah perbandingan antara diameter saluran dalam instalasi

sistem vakum (D) dan lintasan bebas rata-rata (λ) molekul/atom gas yang nilainya adalah

$$K_n = \frac{D}{\lambda}. \quad (3.4)$$

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 3.2.



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

Gambar 3.2. Jenis Aliran yang terjadi pada teknik vakum [11].

Aliran kental (Gambar 3.2a) 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 (R_e) 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 3.2b) 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 3.2c) 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.

3.2. Daya Hantar Aliran Kental

Besar daya hantar (konduktansi) saluran (C) untuk aliran kental dapat ditentukan dengan persamaan semi empirik:

- a. Untuk saluran berpenampang lingkaran (Gambar 3.1), daya hantar (C) ditentukan menggunakan persamaan [12]

$$C=2,86\frac{PR^4}{L} \quad (3.5)$$

- b. Untuk saluran berpenampang segi empat, daya hantar (C) ditentukan menggunakan persamaan [12]

$$C = 1,83 \frac{l^2 w^2 Y P}{L} \quad (3.6)$$

dengan R jari-jari penampang pipa (mm), L panjang saluran (mm), P tekanan (Torr), l sisi panjang penampang segi empat (mm), w sisi pendek penampang segi empat (mm) dan Y faktor koreksi. Besar faktor koreksi untuk penampang segi empat ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Faktor koreksi penampang segi empat untuk persamaan (3.6) [12].

l/w	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Y	0,032	0,059	0,081	0,10	0,115	0,126	0,133	0,137	0,139	0,14

Gas yang divakumkan merupakan bentuk fluida yang dapat termampatkan (*compressible*) maka untuk menentukan daya hantar saluran pada aliran kental di samping menggunakan persamaan (3.5) dan (3.6) dapat ditentukan dengan persamaan adiabatik [2]

$$C = \frac{9,13 A}{1 - \frac{P_2}{P_1}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2 \gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{T_1}{M} \right) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

dan

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3.7.a)$$

dengan A adalah penampang aliran (cm²), C daya hantar (liter/detik), P tekanan (Torr) dan T temperatur (K).

a. Saluran berpenampang lingkaran

Dengan menurunkan persamaan (3.7) dan memasukan besaran-besaran fisika akan didapatkan besar daya hantar (C) untuk berbagai dimensi yaitu untuk penampang lingkaran, segi empat, maupun *annular*. Berdasarkan penjabaran persamaan (3.7) untuk saluran berpenampang lingkaran (Gambar 3.1), daya hantar saluran (C) dapat ditentukan menggunakan persamaan [2]

$$C = 3,27 \times 10^{-2} \left[\frac{D^4}{(\eta L)} \right] \bar{P} \quad (3.8)$$

dengan \bar{P} adalah tekanan rata-rata di dalam saluran (Torr), D diameter saluran (cm), L panjang saluran (cm), η viskositas gas (poise) dan C daya hantar saluran (liter/detik).

b. Saluran berpenampang segi empat

Daya hantar untuk penampang segi empat, Guthrie dan Wackerling (1949) memberikan persamaan dalam satuan CGS [2]

$$C = 3,54 \times 10^{-2} Y \left[\frac{A^2}{(\eta L)} \right] \bar{P} \quad (3.9)$$

dengan A adalah luas penampang saluran. Persamaan (3.9) dapat disederhanakan menggunakan satuan praktis sebagai berikut

$$C = 4,71 \times 10^{-2} Y \left[\frac{(l \times w)^2}{(\eta L)} \right] \bar{P} \quad (3.10)$$

dengan $A = (l \times w)$ adalah penampang saluran (cm²), Y faktor koreksi, \bar{P} tekanan rata-rata di dalam saluran (Torr), L panjang saluran (cm), η viskositas gas (poise) dan C daya hantar saluran (liter/detik). Besar faktor koreksi untuk persamaan (3.10) ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Faktor koreksi penampang segi empat untuk persamaan (3.10)[2]

l/w	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Y	0,23	0,42	0,58	0,71	0,82	0,90	0,95	0,98	0,99	1,0

c. Saluran berpenampang annular

Untuk saluran berpenampang *annular* yaitu dengan jari-jari pipa bagian luar (r_o) dan jari-jari pipa bagian dalam (r_i) sehingga aliran gas melalui celah antara pipa bagian dalam dan luar atau celah pada pipa yang disusun secara konsentris. Daya hantar saluran dapat ditentukan dengan persamaan [2]

$$C = \left(\frac{\pi}{8\eta} \right) \left(\frac{\bar{P}}{L} \right) \left[r_o^4 - r_i^4 - \frac{(r_o^2 - r_i^2)^2}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \right] \quad (3.11)$$

dengan L adalah panjang saluran (cm), D diameter saluran (cm) dan η viskositas (poise). Persamaan (3.11) dengan satuan CGS atau untuk udara pada temperatur 20 °C dapat dituliskan

$$C = 2900 \left(\frac{\bar{P}}{L} \right) \left[r_o^4 - r_i^4 - \frac{(r_o^2 - r_i^2)^2}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \right] \quad (3.12)$$

dengan \bar{P} adalah tekanan rata-rata di dalam saluran (Torr), r_o jari-jari pipa bagian luar (cm), r_i jari-jari pipa bagian dalam (cm) dan C daya hantar saluran (liter/detik).

3.3. Daya Hantar Aliran Molekular

a. Saluran lurus

Perpindahan molekul/atom dalam aliran molekular sangat tergantung dari gerakan acak molekul/atom yang besarnya tergantung pada tenaga/energi kinetik dari molekul/atom tersebut yang besarnya dipengaruhi oleh temperatur sesuai persamaan (2.18). Karena perpindahan molekul/atom tergantung pada energi kinetik yang dipengaruhi oleh temperatur, maka besar daya hantar saluran juga tergantung gerakan acak molekul/atom yang dipengaruhi oleh temperaturnya. Nilai daya hantar saluran (C) untuk aliran molekular secara umum dapat ditentukan dengan persamaan [2]

$$C = \left(\frac{Q}{P_1 - P_2} \right) = 3,64 \cdot 10^3 \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} A \quad (3.13)$$

Untuk aliran molekular pada pipa dilakukan dengan penjabaran lebih lanjut sehingga didapatkan persamaan [2]

$$C = 1,9408 \cdot 10^4 \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{A^2}{B L} \right) \quad (3.14)$$

Persamaan (3.13) dan persamaan (3.4) dalam satuan CGS, dari persamaan tersebut untuk penampang aliran lingkaran didapatkan [2]

$$C = 3,81 \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D^3}{L} \right) \quad (3.15)$$

sedangkan untuk penampang aliran segi empat adalah [2]

$$C = 9,72 \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{l^2 w^2}{(l+w)L} Y \quad (3.16)$$

dengan C adalah daya hantar (konduktansi) saluran (liter/detik), T temperatur gas (K), M berat molekul, A luas penampang aliran (cm^2), B keliling dari penampang aliran (cm), L panjang pipa/saluran (cm), l dan w masing-masing panjang sisi penampang aliran untuk aliran segi empat (cm) dan Y adalah faktor koreksi untuk penampang segi empat. Besar faktor koreksi (Y) untuk penampang segi empat ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Faktor koreksi penampang segi empat untuk persamaan (3.16)[2].

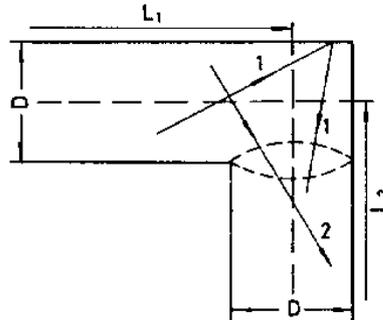
l/w	1	0,667	0,5	0,333	0,2	0,125	0,1
Y	1,108	1,126	1,151	1,198	1,297	1,400	1,444

b. Saluran berbelok

Pada instalasi sistem vakum sering menggunakan belokan (*elbow*) sehingga gerakan molekul/atom akan berbelok sesuai dengan sudut belokan. Ada 2 (dua) kategori gerakan molekul/atom dalam perpindahan melalui belokan yaitu (1) molekul/atom menumbuk dinding sebelum belokan sehingga terpantul dan berbelok dan (2) molekul/atom bergerak lurus kemudian menumbuk dinding setelah belokan sehingga terpantul setelah melalui belokan. Gerakan molekul/atom pada belokan ini ditunjukkan pada Gambar 3.3. Karena ada 2 (dua) kategori gerakan molekul/atom maka untuk menentukan besar daya hantar pada belokan harus ditentukan berdasarkan 2 (dua) kategori tersebut dan selanjutnya digabungkan.

Daya hantar (C) untuk gerakan molekul/atom kategori pertama yaitu molekul/atom menumbuk dinding sebelum belokan sehingga terpantul dan berbelok dapat ditentukan dengan persamaan [2],

$$C_1 = 3,81 \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D^3}{L_1 + L_2 + 1,33D} \right) \quad (3.17)$$



Gambar 3.3. Gerakan molekul/atom pada belokan (*elbow*) [2].

dan untuk kategori kedua yaitu molekul/atom bergerak lurus kemudian menumbuk dinding setelah belokan sehingga terpantul setelah melalui belokan

$$C_2 = 3,81 \left(\frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D^3}{L_1 + L_2} \right) \quad (3.18)$$

Kedua perpindahan molekul/atom untuk kategori pertama dan kedua berjalan secara bersamaan atau paralel, maka daya hantarnya juga berlaku secara paralel sehingga diperoleh persamaan daya hantar saluran (C) untuk belokan

$$C = C_1 + C_2. \quad (3.19)$$

c. Susunan saluran dan laju pemompaan efektif

Pada instalasi sistem vakum, saluran dapat terdiri dari beberapa jenis ukuran dan kemungkinan susunannya secara seri atau paralel. Susunan ini akan mempengaruhi besar daya hantar saluran. Untuk saluran yang disusun secara seri maka besar daya hantar adalah;

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \dots \dots, \quad (3.20)$$

sedangkan untuk saluran yang disusun secara paralel maka besar daya hantar adalah;

$$C = C_1 + C_2 + C_2 + \dots \dots \quad (3.21)$$

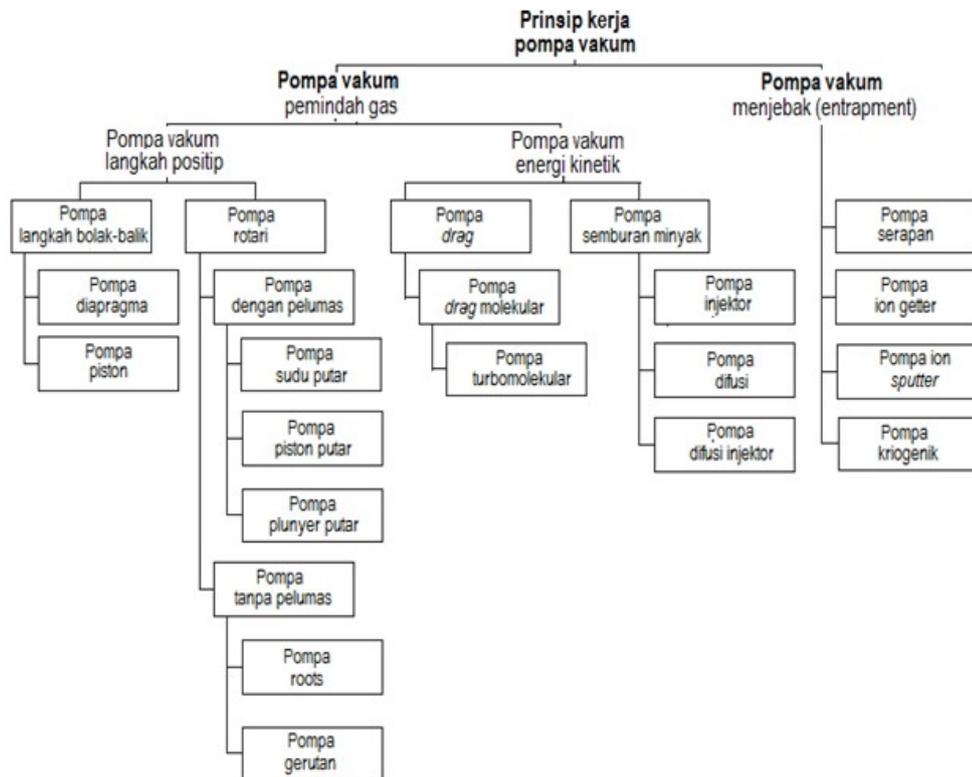
Daya hantar saluran sangat mempengaruhi laju pemompaan di dalam sistem vakum untuk menghasilkan tingkat kevakuman akhir dan waktu yang diperlukan. Gabungan dari laju pemompaan pompa/kemampuan pompa (*pumping speed*) dengan daya hantar saluran akan menghasilkan laju pemompaan efektif. Laju pemompaan efektif adalah laju pemompaan pada sistem vakum yang menentukan pencapaian tingkat kevakuman akhir maupun waktu yang dibutuhkan. Besar laju pemompaan efektif (S_{ef}) dapat dituliskan,

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C} \quad (3.22)$$

dengan S_{ef} adalah laju pemompaan efektif (liter/detik), S_p laju pemompaan pompa yang digunakan (liter/detik) dan C daya hantar secara keseluruhan yang menghubungkan antara pompa dengan sistem yang divakumkan (liter/detik).

BAB IV. JENIS-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 4.1.



Gambar 4.1. Klasifikasi pompa vakum berdasarkan prinsip kerja [13].

4.1. 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 positip (*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 positip adalah untuk memindahkan gas (molekul/atom) dengan mengisap dari sistem yang divakumkan kemudian gas dimampatkan di dalam pompa dan dilanjutkan dengan mengeluarkan dari pompa. Untuk pompa vakum dengan energi kinetik adalah dengan memberikan atau menambahkan energi kinetik molekul/atom dari gas yang dipompa sehingga dapat berpindah dari tekanan yang rendah ke tekanan yang lebih tinggi. Penambahan energi kinetik dilakukan dengan memindahkan momentum dari pompa ke molekul/atom gas sehingga gerakan molekul/atom gas yang dipompa terarah ke sisi pengeluaran gas dari pompa.

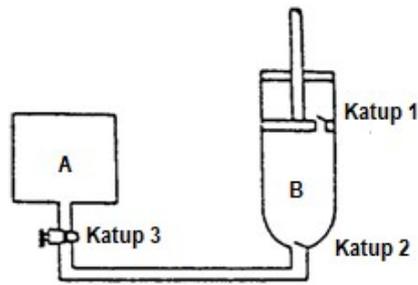
4.1.1. Pompa vakum dengan langkah positip

Berdasarkan klasifikasi (Gambar 4.1) 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 sudu putar (pompa rotari).

a. Pompa piston

Pompa piston termasuk pompa yang banyak digunakan dan merupakan golongan generasi pompa yang awal ditemukan, namun karena kinerja pompa ini tidak dapat mencapai kevakuman yang tinggi maka jarang digunakan untuk pompa vakum. Walaupun jarang digunakan untuk pompa vakum namun sangat penting perannya dalam penemuan-penemuan jenis pompa vakum berikutnya yang saat ini banyak digunakan. Peranan ini adalah digunakannya sebagai dasar perhitungan untuk mencapai kevakuman akhir

dari suatu pompa. Sebagai ilustrasi prinsip kerja pompa ini ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Pompa Piston [2].

Untuk pompa-pompa dengan langkah positif, hal yang penting adalah bagaimana mencapai kevakuman akhir yang tinggi dan dasar perhitungan yang paling mudah dianalogikan dengan pompa piston. Pompa piston (Gambar 4.2) secara garis besar terdiri dari 2 (dua) ruangan yaitu ruang yang divakumkan (ruang A) dan ruang pompa (ruang B), 3 (tiga) katup dan saluran yang menghubungkan ruang A dan ruang B. Katup 1 dan katup 2 pada pompa disusun sedemikian rupa sehingga dapat memompa keluar gas di dalam ruang A. Jika piston bergerak dari bawah menuju ke atas, pada gerakan ini katup 1 tertutup dan katup 2 terbuka. Dengan demikian gas di dalam tangki A diisap/diekspansikan ke ruang B. Selanjutnya piston bergerak ke bawah, pada gerakan ini katup 1 terbuka dan katup 2 tertutup. Dengan demikian gas di ruang pompa B dikeluarkan ke udara sekitar.

Untuk volume gas di ruang A (V_A) dan di ruang B (V_B), maka dalam satu langkah V_A diekspansikan menjadi $V_A + V_B$, sehingga tekanan direduksi dari tekanan awal (P) menjadi tekanan setelah diekspansikan (P_1) sesuai persamaan

$$P_1 = \frac{V_A}{V_A + V_B} P \quad (4.1)$$

dan setelah berulang kali selama n langkah, maka tekanan akhir (P_n)

$$P_n = \left[\frac{V_A}{V_A + V_B} \right]^n P \quad (4.2)$$

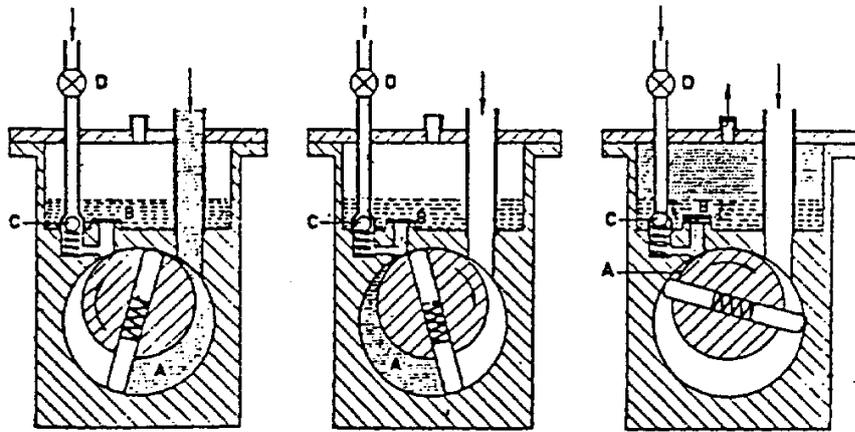
Dengan asumsi tidak ada kebocoran, tekanan minimum atau tekanan akhir yang dapat dicapai ditentukan oleh volume mati atau volume yang paling kecil (V_D) dari pompa pada saat piston dalam posisi paling bawah. Tekanan akhir yang dapat dicapai (P_o) adalah

$$P_o = 760 \frac{V_D}{V_B} \quad (4.3)$$

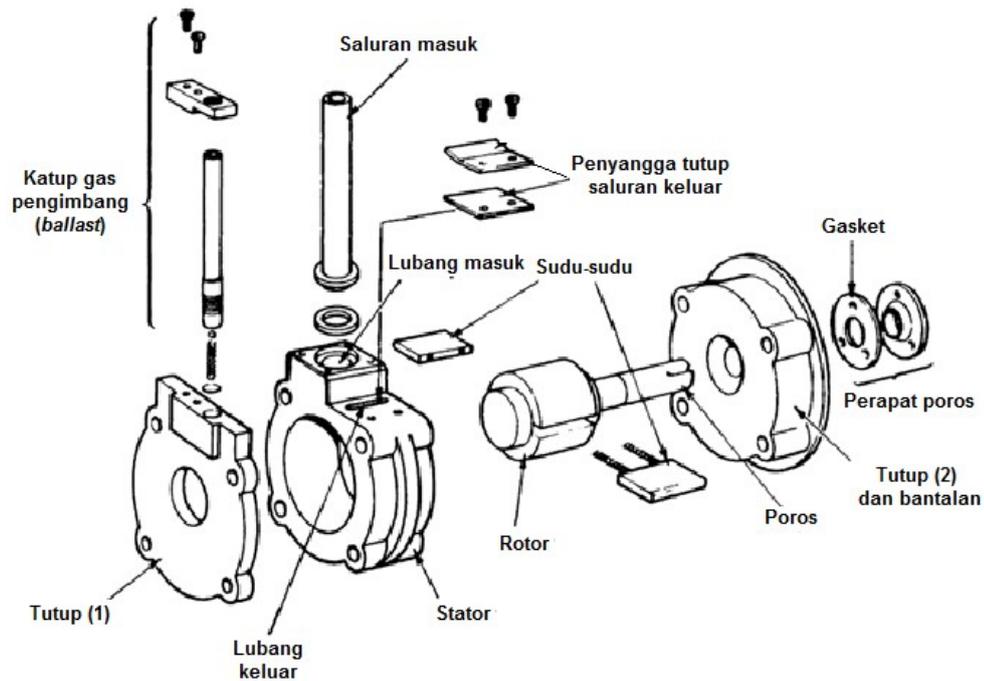
Persamaan (4.3) digunakan sebagai dasar untuk menentukan tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai dari pompa-pompa langkah positif. Karena untuk pompa piston dengan gerakan bolak-balik sulit untuk memperkecil volume mati (V_D) maka kevakuman akhir yang dapat dicapai rendah sehingga jarang digunakan untuk pompa vakum.

b. Pompa sudu putar

Pompa sudu putar (*rotary vane pump*) biasanya juga disebut pompa sudu luncur atau pompa rotari, pompa ini mempunyai rotor dan stator berbentuk silinder yang disusun secara eksentrik sehingga antara rotor dan stator terjadi celah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan detail komponen-komponennya ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.3. Pompa sudu putar [12].



Gambar 4.4. Detil komponen-komponen pompa sudu putar[2].

Pada rotor terdapat 2 (dua) buah sudu putar yang ditengahnya dipasang pegas sehingga pada saat rotor berputar di dalam stator secara eksentrik sudu putar akan meluncur dan menempel pada dinding stator. Sudu-sudu putar ini dapat bergerak bebas di celah pada rotor dan dengan bantuan minyak pelumas maka baik antara rotor dan sudu putar, sudu putar dengan stator, maupun rotor dan stator akan selalu rapat. Dengan berputarnya rotor maka ruangan pada sisi masuk diekspansikan dan ruangan pada sisi keluar dimampatkan, sehingga dapat memindahkan gas dari sistem yang dihampakan ke udara sekitar.

Dengan analogi pompa piston, untuk pompa sudu putar/pompa rotari secara teori kehampaan akhir juga ditentukan oleh adanya volume mati. Volume mati pada pompa sudu putar adalah volume pada saat posisi sudu tepat pada pintu keluar gas yang dipompa dan sumbu pada saat rotor dan stator pada posisi rapat. Kehampaan yang dapat dicapai dengan pompa rotari 2-tingkat adalah sekitar 10^{-3} Torr (berdasarkan katalog dari pabrikan dapat mencapai sekitar 5×10^{-4} Torr).

Jika di dalam sistem vakum terisi uap air, maka pada saat dihampakan uap air akan ikut terpompa. Selanjutnya pada sisi keluaran dari pompa, uap air tersebut akan termampatkan dan memungkinkan uap air berkondensasi. Dengan kondensasinya uap air dapat memberikan kontaminasi pada minyak pelumas dan ikut sirkulasi di dalam pompa dan menurunkan fungsi minyak pelumas baik untuk pelumasan maupun perapat (*seals*). Untuk mengatasi agar tidak terjadi kondensasi biasanya pompa sudu putar (pompa rotari) dilengkapi dengan katup penyeimbang gas (*gas ballast*) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.5. Prinsip kerjanya menggunakan penyeimbang gas (*gas ballast*) untuk menghindari terjadinya kondensasi pada sisi keluarnya gas yang dipompa dengan memasukan sebagian udara luar pada akhir langkah kompresi. Dengan menambahkan udara pada akhir langkah kompresi akan menurunkan persentase kandungan uap air sehingga dapat menurunkan tekanan parsial dan mencegah terjadinya kondensasi uap air, sehingga kemungkinan terjadinya kontaminasi uap air pada minyak pelumas dapat dihindari.

Untuk memberikan pengertian khususnya yang berhubungan dengan pemakaian penyeimbang gas (*gas ballast*) ada beberapa hal yang harus diperhatikan meliputi perbandingan kompresi (C_r) yaitu perbandingan volume yang dipindahkan maksimum dan minimum antara rotor dan stator

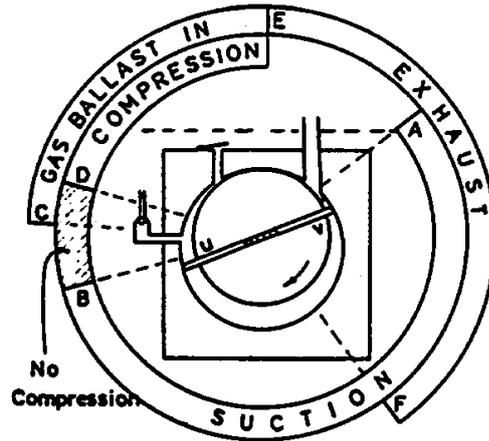
$$C_r = \frac{P_e}{P_v + P_g} \quad (4.4)$$

dengan C_r adalah perbandingan kompresi, P_e tekanan injeksi yang diperlukan untuk membuka katup (Torr), P_v tekanan parsial dari uap (uap air) pada sisi masuk pompa (Torr) dan P_g tekanan parsial dari gas permanen (udara) pada sisi masuk pompa (Torr).

Nilai maksimum P_v agar tidak terjadi kondensasi uap selama kompresi ditentukan dengan persamaan [2]

$$C_r = \frac{P_s}{P_v} \quad (4.5)$$

dengan P_s adalah tekanan jenuh dari uap air (Torr)



Gambar 4.5. Prinsip kerja pompa dengan gas *ballast* [2].

Dari persamaan (4.4) dan (4.5), jika disubstitusikan didapatkan nilai P_v

$$P_v = \frac{P_s P_g}{P_e P_s} \quad (4.6)$$

Dengan mengasumsikan temperatur operasi pompa (T) = 60 °C, P_s = 150 Torr dan P_e = 1,4 atm \approx 1060 Torr maka didapatkan P_v = 0,155 P_g . Dengan demikian kondensasi uap air di dalam pompa akan terjadi jika tekanan parsial dari uap air pada sisi masuk pompa melebihi 15,5 % dari tekanan udara. Apabila menggunakan penyeimbang gas (*gas ballast*), persamaan (4.6) menjadi [2]

$$P_v = \frac{P_s P_g + P_s P_b \left(\frac{S_b}{S}\right)}{P_e - P_s} \quad (4.7)$$

dan

$$S_b = \frac{S}{P_b} \left[\frac{P_e P_v}{P_s} - P_v - P_g \right] \quad (4.8)$$

dengan P_b adalah tekanan total gas (udara) penyeimbang (*ballast*) (Torr), S laju pemompaan (liter/detik), S_b laju aliran gas penyeimbang atau udara yang melalui katup penyeimbang gas (liter/detik).

Persamaan (4.8) akan berubah jika kandungan uap air dari penyeimbang gas (*gas ballast*) disetarakan dengan tekanan parsial uap air (P_h), sehingga didapatkan persamaan [2]

$$P_v = \left(\frac{P_s}{S}\right) \left(\frac{T}{T_o}\right) \left[\frac{P_g S + (P_b - P_h) S_b}{P_e - P_s} - \frac{S_b P_h}{P_s} \right] \quad (4.9)$$

dengan P_h adalah tekanan parsial dari uap air dari penyeimbang gas/udara atmosfer (Torr), T temperatur pompa (°C), T_o temperatur sekitar (°C), C_r perbandingan kompresi.

Penggunaan penyeimbang gas (*gas ballast*)

- **Keuntungan**

Menghindari terjadinya kondensasi uap air di dalam pompa sehingga dapat mencegah terjadinya kontaminasi antara air atau uap air dengan minyak pelumas.

- **Kerugian**

Mengurangi tingkat kehampaan akhir yang dapat dicapai (tekanan akhir bertambah). Karena itu, penggunaan penyeimbang gas tidak menguntungkan jika tidak diperlukan. Biasanya penyeimbang gas hanya digunakan pada saat pemompaan awal yaitu saat kelembaban udara yang divakumkan cukup tinggi

c. Pompa diafragma (*diaphragm pump*)

Perbedaan yang spesifik dengan pompa piston adalah untuk pompa diafragma tidak menggunakan piston melainkan menggunakan membran (diafragma) untuk mengisap dan memampatkan/mengkompresi serta mengeluarkan gas yang divakumkan. Untuk memompa dengan memanfaatkan ruang kompresi akibat gerakan membran (diafragma) yang terbuat dari bahan yang lentur (misalnya: karet, viton). Pompa ini tidak menggunakan minyak pelumas pada daerah membran sehingga bebas dari kontaminasi uap minyak pelumas sehingga sangat cocok untuk keperluan di laboratorium kimia. Pompa ini tidak cocok untuk penggunaan pada sistem dengan perbandingan kompresi yang tinggi karena dibatasi oleh volume mati dan volume maksimum akibat gerakan membran/diafragma saat pengisapan (pemompaan) dan pemampatan

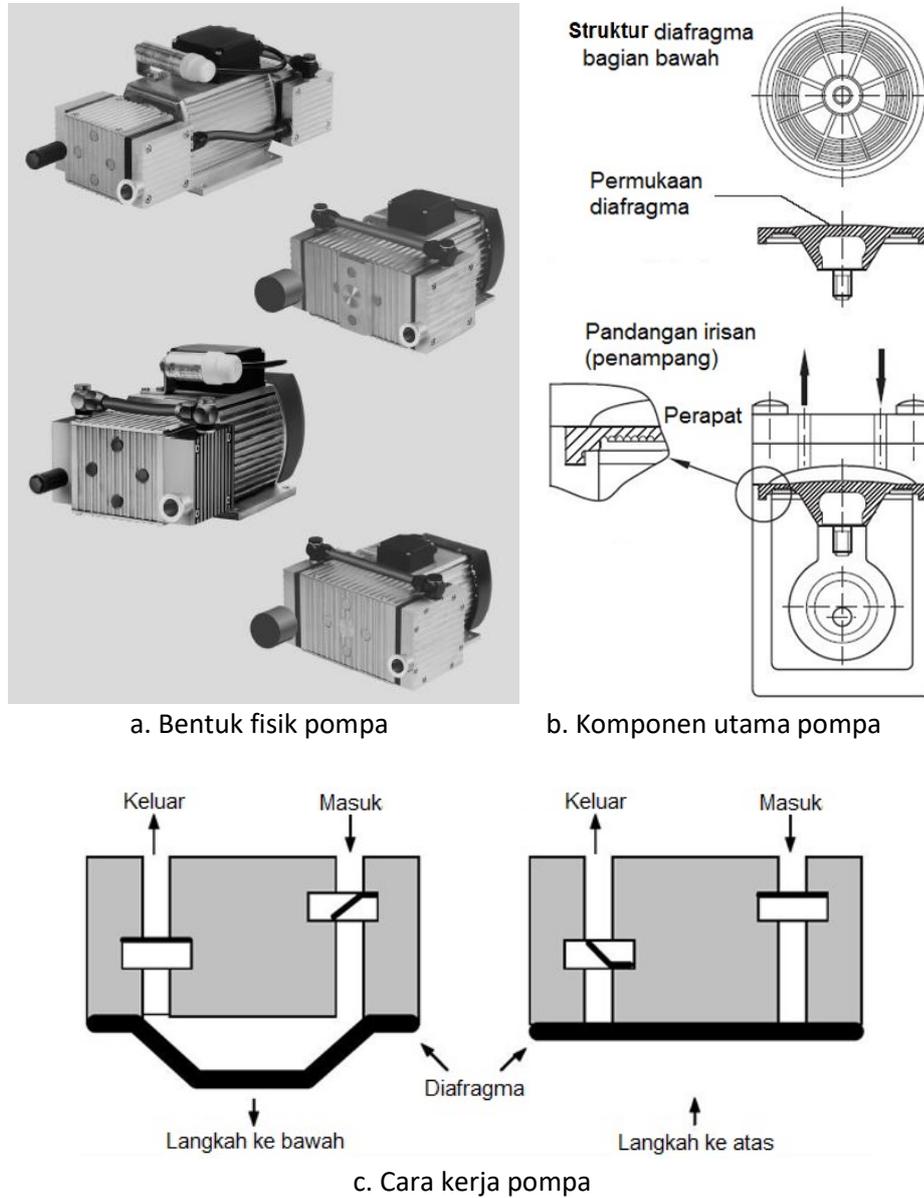
(pengeluaran gas). Untuk pompa diafragma 1 (satu) tingkat dapat mencapai kevakuman akhir sekitar 80 mbar, sedangkan untuk 2 (dua) tingkat adalah sekitar 10 mbar. Pompa ini dapat dikonstruksi hingga mencapai 4 (empat) tingkat, kevakuman akhir untuk tiga tingkat dapat mencapai sekitar 2 mbar, sedangkan untuk 4 (empat) tingkat sekitar 5×10^{-1} mbar [13]. Sesuai dengan kemampuannya maka pompa ini juga dapat digunakan sebagai pompa depan dari pompa turbomolekular [13]. Jadi pompa ini mempunyai kemampuan memvakumkan lebih rendah dibandingkan dengan pompa sudu putar yaitu sampai tingkat kevakuman orde 10^{-1} mbar untuk pompa diafragma dan orde 10^{-3} mbar untuk pompa sudu putar. Tetapi mempunyai keunggulan yaitu lebih bersih dari pompa sudu putar karena tidak ada kontaminasi dari uap minyak pelumas.

Bentuk dan prinsip kerja pompa diafragma ditunjukkan pada Gambar 4.6. Gambar 4.6a menunjukkan bentuk fisik dari pompa, sedangkan Gambar 4.6b menunjukkan komponen utama dari pompa termasuk bentuk membran (diafragma) yang digunakan. Gambar 4.6c menunjukkan cara kerja pompa diafragma. Pada pompa ini, membran (diafragma) di samping berfungsi untuk gerakan langkah pengisapan (langkah ke bawah) dan memampatkan/mengeluarkan gas (langkah ke atas) juga sekaligus sebagai perapat. Pada saat pengisapan, yaitu langkah ke bawah, maka terjadi ekspansi ruangan dan katup saluran masuk terbuka serta katup saluran keluar tertutup sehingga udara/gas yang dipompa masuk ke ruang pompa. Selanjutnya langkah pemampatan yaitu langkah ke atas maka udara/gas akan dimampatkan dan katup saluran keluar terbuka sehingga udara/gas dikeluarkan dari ruang pompa. Proses ini berulang terus hingga terjadi pemvakuman ruang yang divakumkan.

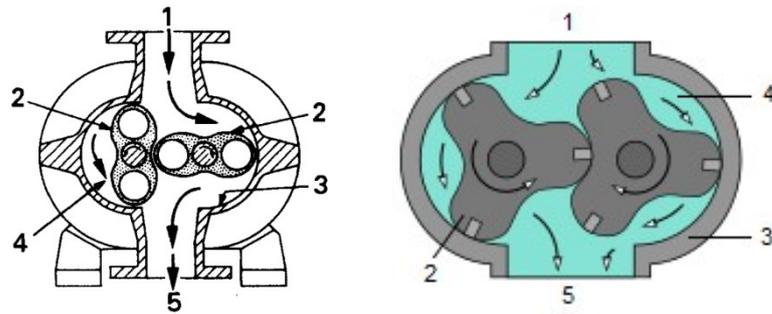
d. Pompa Roots

Prinsip pompa Roots yang juga disebut pompa Lobe, ditemukan pada tahun 1848 oleh Isaiiah Davies, dan 20 tahun kemudian diimplementasikan oleh Americans Francis and Philander Higley Roots sebagai *blower* untuk motor pembakaran dalam [13]. Pengembangan selanjutnya digunakan untuk pompa vakum pendorong sejak tahun 1954. Pompa ini mempunyai laju pemompaan yang sangat tinggi hingga mencapai $100.000 \text{ m}^3/\text{jam}$ dan lebih efektif dibandingkan dengan pompa uap injektor pada rentang tekanan operasi yang sama [13]. Pompa uap injektor adalah pompa yang prinsip kerjanya berdasarkan semburan/pancaran uap, prinsip kerja pompa ini hampir sama

dengan prinsip kerja pompa difusi (4.1.2b). Perbedaannya, untuk pompa injektor adalah kerapatan uap yang disemburkan/dipancarkan lebih tinggi dan jarak pancar yaitu jarak *nozzle* ke dinding berpendingin lebih pendek sehingga laju pemompaan lebih tinggi namun tingkat kevakuman lebih rendah.



Gambar 4.6. Pompa diafragma[14], [15].



a. Sudu 2 ujung [13], [16] b. Sudu 3 ujung [17]

Keterangan

- | | |
|------------------|-------------------|
| 1. saluran masuk | 4. ruang pompa |
| 2. sudu | 5. saluran keluar |
| 3. rumah pompa | |

Gambar 4.7. Prinsip kerja pompa Roots (Lobe).

Perbandingan kompresi yang dapat dicapai antara 10 sampai 100 pada daerah rentang tekanan operasi sekitar 1 mbar. Masing-masing sudu digerakkan dengan transmisi roda gigi dengan putaran yang sesuai (*synchronism*) dan arah berlawanan, celah di antara sudu dengan sudu dan sudu dengan rumah pompa sekitar 0,2 mm sehingga tidak ada gesekan baik di antara sudu maupun dengan rumah pompa. Karena tidak ada gesekan maka dapat dioperasikan pada putaran tinggi yaitu antara 3000 rpm sampai 3500 rpm [4]. Permasalahan pada pompa Roots adalah terjadinya pemanasan pada sudu yang disebabkan oleh karena kompresi gas serta kesulitan dalam pendinginan. Untuk menghindari terjadinya pemanasan lebih maka dibuat saluran pintas dengan katup otomatis. Katup ini akan terbuka secara otomatis jika tekanan gas keluar pompa lebih besar dari yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, pompa ini tidak digunakan untuk menekan hingga mendekati tekanan atmosfer dan hanya digunakan pada rentang tekanan antar 10 Torr sampai orde 10^{-4} Torr. Karena hal tersebut maka pompa Roots digunakan sebagai pompa pendorong (*booster*) antara pompa rotari 1 tingkat dengan pompa difusi atau pompa turbomolekular. Hal ini karena jika pompa rotari 1 tingkat digunakan sebagai pompa depan dari pompa difusi atau pompa turbomolekular akan diperoleh laju pemompaan yang tidak optimal, sehingga perlu dipasang pompa Root di

antara pompa rotari dan pompa difusi atau pompa turbomolekular sebagai pompa pendorong. Hal ini akan diuraikan lebih rinci pada Subbab 4.3 tentang daerah tekanan operasi pompa dan laju pemompaan. Bentuk dan prinsip kerja pompa Root atau pompa Lobe ditunjukkan pada Gambar 4.7. Gambar 4.7a menunjukkan bentuk pompa dengan sudu 2 (dua) ujung, sedangkan Gambar 4.7b menunjukkan bentuk pompa dengan sudu 3 (tiga) ujung. Kedua jenis pompa (Gambar 4.7) tersebut mempunyai cara kerja yang sama yaitu dengan berputarnya sudu-sudu maka akan menjebak dan mendorong gas dari sisi masuk ke sisi keluar. Jika sisi masuk dihubungkan dengan bejana yang divakumkan dan sisi keluar dihubungkan dengan pompa depan maka terjadi pemvakuman bejana. Jika pompa ini digunakan sebagai pompa pendorong (*booster*) maka sisi masuk dihubungkan dengan pompa difusi atau turbomolekular.

4.1.2. Pompa vakum energi kinetik

Berdasarkan klasifikasi (Gambar 4.1), jenis-jenis pompa yang termasuk dalam pompa vakum dengan energi kinetik dibagi menjadi 2 (dua) jenis yaitu: (1) pompa *drag* dan (2) pompa semburan minyak.

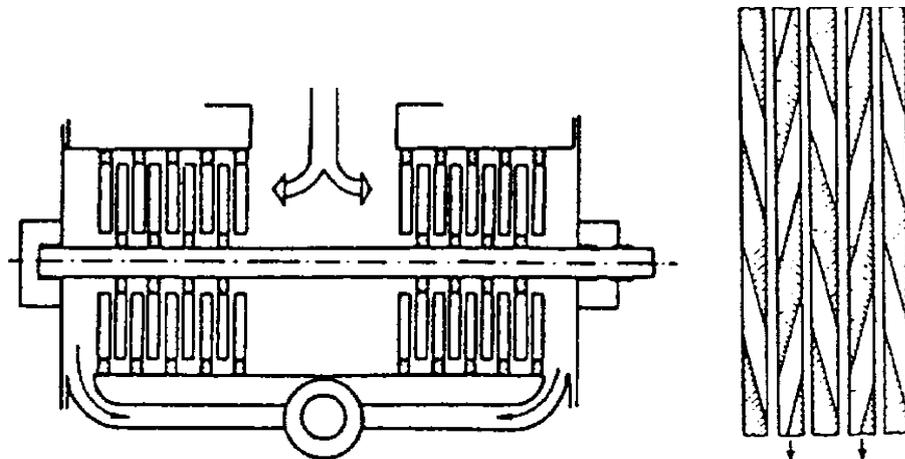
Jenis pompa *drag* dalam penerapannya adalah pompa *drag* molekular atau biasa disebut pompa turbomolekular. Untuk jenis-jenis pompa semburan minyak dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu (1) pompa injektor, (2) pompa difusi, dan (3) pompa difusi injektor. Dari jenis-jenis pompa vakum ini yang paling banyak digunakan adalah jenis pompa turbomolekular dan pompa difusi, sehingga yang akan dibahas secara rinci adalah kedua pompa tersebut. Kedua jenis pompa tersebut mempunyai kemampuan dari tingkat kevakuman sedang sampai ke tingkat kevakuman tinggi atau sangat tinggi dan harus dilengkapi dengan pompa depan (*fore pump*) yaitu pompa sudu putar. Untuk pompa turbomolekular di samping menggunakan pompa sudu putar sebagai pompa depan juga dapat menggunakan pompa diafragma 4 (empat) tingkat.

a. Pompa Turbomolekular

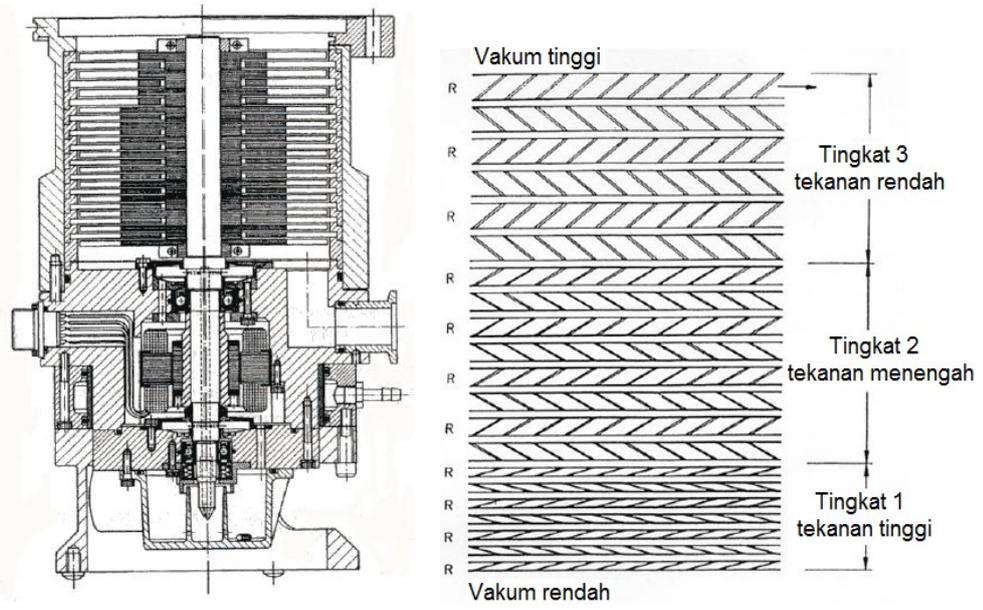
Ada 2 (dua) jenis pompa turbomolekular yaitu (1) jenis horisontal dan (2) jenis vertikal seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. Kedua jenis pompa ini mempunyai komponen-komponen dan prinsip kerja yang sama, perbedaannya hanya pada konstruksi yaitu horisontal dan vertikal. Pompa

turbomolekular jenis horisontal adalah jenis pompa yang diproduksi sebelum ditemukannya pompa turbomolekular jenis vertikal. Pada saat ini pompa turbomolekular jenis horisontal tidak diproduksi karena mempunyai kerugian yaitu untuk kapasitas yang sama mempunyai ukuran yang jauh lebih besar sehingga harganya jauh lebih mahal.

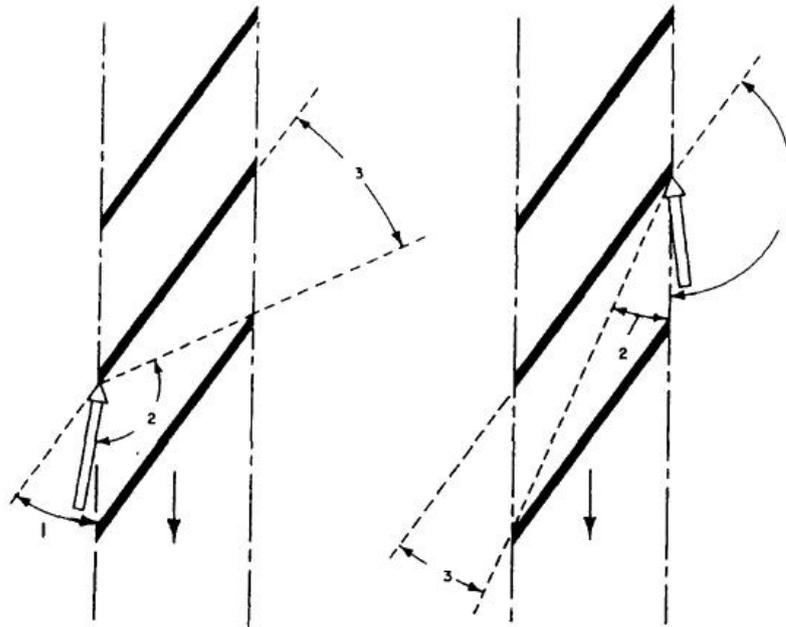
Pompa turbomolekular (Gambar 4.8 dan Gambar 4.9) karena mempunyai prinsip kerja yang sama maka yang diuraikan prinsip kerjanya hanya pompa turbomolekular jenis vertikal (Gambar 4.9). Pompa ini mempunyai prinsip kerja didasarkan pada arah kecepatan yang diberikan pada molekul/atom gas yang dikenakan pada permukaan yang sedang bergerak sangat cepat. Pompa ini terdiri atas celah-celah sudu bertingkat dalam arah aksial yang berputar (rotor) dan sudu-sudu tetap pada cakram (stator). Susunan sudu pada cakram memotong celah penangkap molekul/atom gas dalam celah-celah sudu yang bergerak. Toleransi rongga antar cakram yang bergerak (rotor) dan cakram yang tetap (stator) berkisar 1 mm. Kecepatan putar pompa (rotor) untuk diameter rotor 17 cm antara 16.000 rpm sampai 42.000 rpm, biasanya kecepatan keliling rotor sekitar 80 m/detik [2], menurut acuan lain disebutkan kecepatan putar pompa (rotor) adalah 14.000 rpm hingga 90.000 rpm [15]. Pompa ini mempunyai perbandingan kompresi tiap tingkatnya sekitar 5 dan biasanya pompa turbomolekular terdiri dari beberapa tingkat yaitu sekitar 9 tingkat [2].



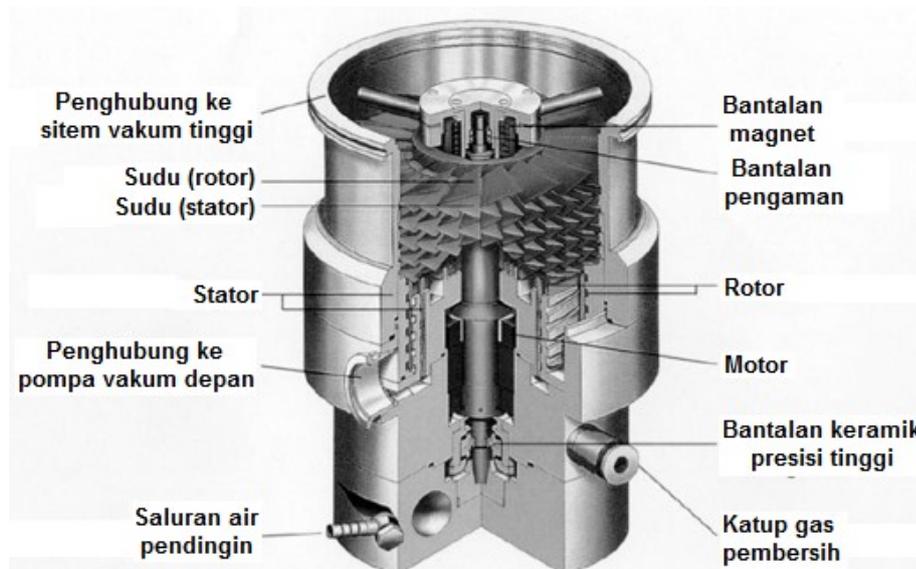
Gambar 4.8. Pompa turbomolekular (jenis horisontal) [2].



Gambar 4.9. Pompa turbomolekular (jenis vertikal) [15].

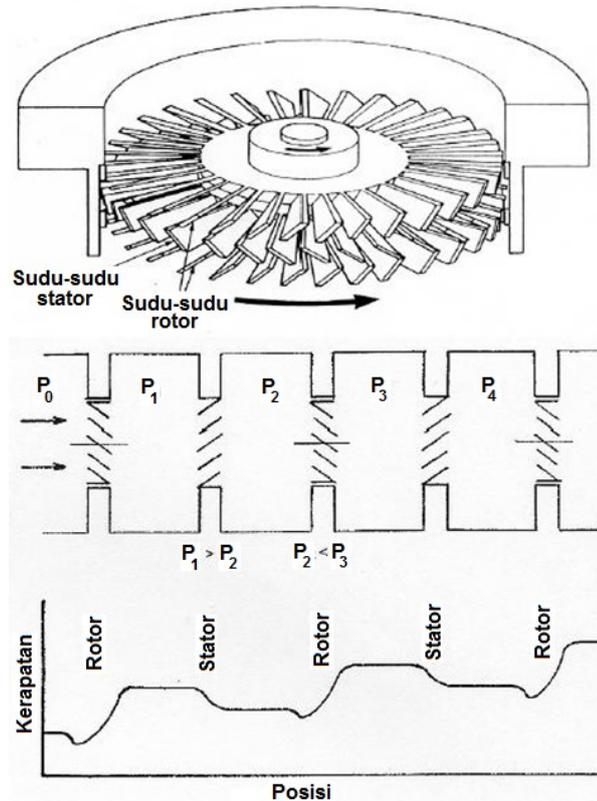


Gambar 4.10. Pemindahan momentum pada sudu-sudu pompa turbomolekular [4].



Gambar 4.11. Bagian-bagian pompa turbomolekular [15].

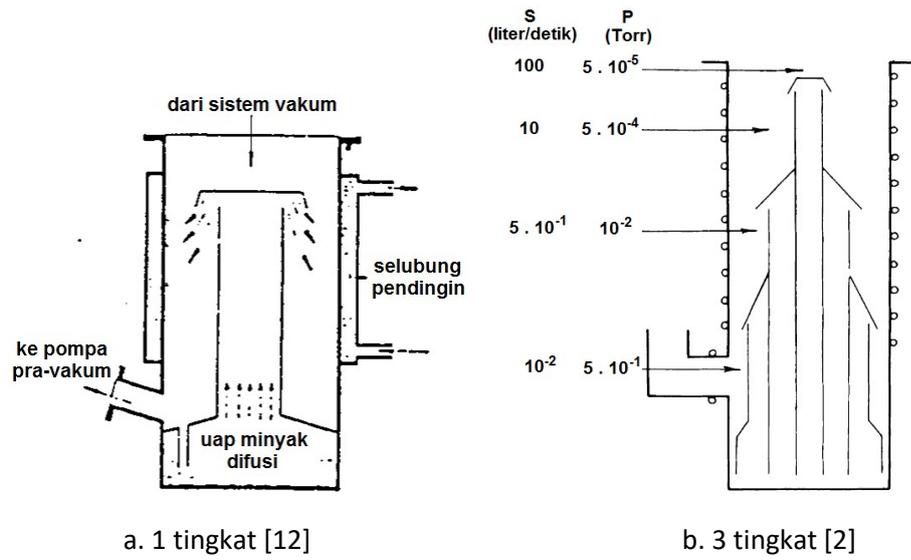
Dengan jumlah tingkat ini maka mempunyai perbandingan kompresi $5^9 \approx 2 \times 10^6$ pada kondisi tidak ada aliran (*zero flow*). Pompa turbomolekular jenis vertikal juga disebut *molekular drag pump*. Adapun pembagian daerah tingkat tekanan ditunjukkan pada Gambar 4.9 dan prinsip perpindahan momentum ditunjukkan pada Gambar 4.10, sedangkan komponen-komponen utama secara lebih detil ditunjukkan pada Gambar 4.11. Pembagian daerah tingkat tekanan dibedakan berdasarkan tingkat kelandaian/kemiringan sudu (*blade*). Makin landai sudut sudu makin tinggi tekanannya (makin rendah tingkat kevakumannya). Prinsip kerja pompa ini berbeda dengan pompa vakum langkah positif karena untuk memvakumkan dilakukan dengan perpindahan momentum dari sudu-sudu ke molekul-molekul/atom-atom gas yang divakumkan sehingga molekul-molekul/atom-atom gas tersebut mempunyai energi kinetik untuk berpindah dari tekanan rendah ke tekanan yang lebih tinggi. Pada tiap-tiap daerah tingkat tekanan terjadi perubahan tekanan yang menyebabkan terjadinya perubahan kerapatan molekul/atom seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12.



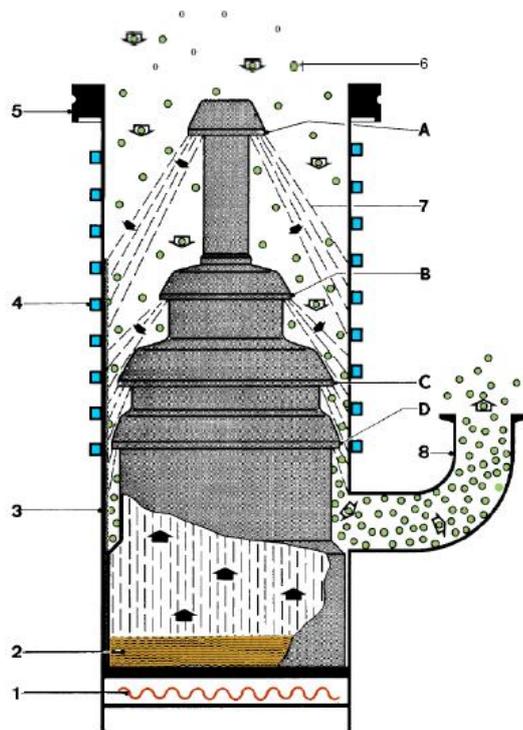
Gambar 4.12. Kerapatan molekul pada sudu-sudu pompa turbomolekular [15].

b. Pompa difusi

Pompa difusi merupakan jenis pompa dengan prinsip kerja berdasarkan semburan/pancaran gas (uap minyak difusi) untuk mendorong molekul-molekul/atom-atom yang dipompa. Agar kehampaan akhir yang dapat dicapai oleh pompa difusi lebih tinggi maka biasanya dibuat bertingkat seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14. Pada Gambar 4.13a ditunjukkan pompa difusi 1 tingkat dan pada Gambar 4.13b ditunjukkan pompa difusi 3 tingkat. Gambar 4.13a menunjukkan adanya aliran uap minyak difusi dari bagian bawah pompa ke atas melalui bagian tengah pompa dan selanjutnya keluar melalui *nozzle* (celah sempit) yang diarahkan ke dinding pompa bagian bawah. Pada dinding pompa dipasang selubung pendingin untuk mendinginkan uap minyak difusi sehingga terjadi kondensasi dan mengalir ke bagian bawah pompa untuk dipanaskan kembali.



Gambar 4.13. Pompa difusi.



Keterangan

1. Pemanas
 2. Minyak difusi
 3. Rumah pompa
 4. Koil pendingin
 5. Flens
 6. Partikel gas
 7. Uap minyak difusi
 8. *Backing vacuum port*
- A-D. *Nozzle*

Gambar 4.14. Prinsip kerja pompa difusi [15].

Gambar 4.13b menunjukkan pompa difusi 3 tingkat dengan daerah-daerah perubahan tekanan yang terjadi (pada masing-masing tingkat), perubahan tekanan (P) berbanding terbalik dengan laju pemompaan (S). Adapun prinsip kerjanya ditunjukkan pada Gambar 4.14. Pada pompa difusi (Gambar 4.14), minyak difusi ditempatkan di bagian bawah (bejana didih) dan selanjutnya dipanaskan sampai terjadi pendidihan. Akibat mendidihnya minyak difusi, maka uap minyak difusi naik ke atas melalui tabung tengah dan dengan dipasangnya *nozzle* maka uap minyak difusi akan menyembur/memancar dan menumbuk molekul-molekul/atom-atom gas ke arah bawah menuju dinding pompa membentuk tabir uap. Pada dinding pompa difusi dipasang suatu pendingin untuk mendinginkan uap minyak difusi yang disemburkan/dipancarkan dari *nozzle*. Akibat pendinginan ini uap minyak difusi mengembun dan kembali ke bejana didih, sedangkan akibat pancaran uap minyak difusi maka molekul-molekul/atom-atom gas di sekitar *nozzle* terdorong ke bawah bersama uap minyak difusi. Pada kondisi ini, terjadi perpindahan momentum molekul-molekul minyak difusi ke molekul-molekul/atom-atom gas yang dipompa sehingga terjadi penambahan energi kinetik. Dengan tambahan energi kinetik dari molekul-molekul minyak difusi maka molekul-molekul/atom-atom gas yang dipompa mempunyai energi yang cukup untuk bergerak dari tekanan yang lebih rendah ke tekanan yang lebih tinggi di dalam pompa difusi. Dengan demikian terjadi pemvakuman ruangan di atas tabir serta ruangan sistem yang dihubungkan.

Pompa difusi ini mempunyai rentang daerah tekanan operasi antara 10^{-2} - 10^{-8} Torr, sehingga untuk pengoperasiannya diperlukan pompa pra vakum misalnya pompa rotari agar dapat dicapai tekanan operasi rentang daerah tekanan operasi tersebut.

Kebutuhan minyak difusi

Sesuai uraian prinsip kerja pompa difusi yaitu untuk memindahkan molekul-molekul/atom-atom gas dengan menyemburkan uap minyak difusi. Selanjutnya molekul-molekul minyak difusi bercampur dengan molekul-molekul/atom-atom gas yang dipompa sehingga sebagian molekul-molekul minyak difusi ikut keluar bersama-sama molekul-molekul/atom-atom gas yang dipompa. Hal ini akan terjadi walaupun pada sisi keluarnya gas dari pompa difusi sudah dipasang perangkat-perangkat minyak difusi untuk menangkap/menjebak minyak difusi yang keluar dari pompa. Susunan perangkat minyak

difusi ini ditunjukkan pada Gambar 4.15. Jumlah minyak difusi yang ikut keluar dari pompa difusi bersama-sama dengan gas yang dipompa dapat dilakukan dengan contoh perhitungan sebagai berikut [18]:

Contoh 1

Suatu instalasi sistem vakum mempunyai volume 200 liter, terjadi desorpsi yang merupakan beban gas yang harus divakumkan setelah katup vakum adalah 1×10^{-3} mbar \times liter/detik, untuk mencapai tingkat kevakuman 1×10^{-5} mbar diperlukan waktu 30 menit dan jumlah yang divakumkan 10 bejana tiap hari. Berdasarkan spesifikasi konsumsi minyak difusi untuk jenis pompa DIF 250 adalah 7×10^{-5} gram/mbar liter dan volume minyak difusi yang harus diisikan adalah 300 cm^3 atau 240 gram (data spesifikasi teknis)[18]. Total gas yang dipompa dalam satuan mbar liter per hari jika pembukaan katup dimulai pada tekanan 0,1 mbar dapat dihitung sebagai berikut:

1. Jumlah gas yang dipompa = $200 \text{ liter} \times 0.1 \text{ mbar} = 20 \text{ mbar liter}$
2. Jumlah gas akibat laju desorpsi = $(1 \times 10^{-3}) \times 30 \times 60 = 1,8 \text{ mbar liter}$
3. Jumlah gas yang dipompa tiap bejana per hari = $20 + 1,8 = 21,8 \text{ mbar liter}$
4. Jumlah gas yang dipompa setiap hari = $21,8 \times 10 = 218 \text{ mbar liter}$
5. Jadi minyak difusi yang ikut keluar setiap hari = $218 \times (7 \times 10^{-5}) = 1,526 \times 10^{-2} \text{ gram}$. Jika dilihat untuk pengoperasian dalam 1 (satu) hari tidak akan mengganggu operasi pompa difusi (dibandingkan dengan volume minyak difusi di dalam pompa 240 gram). Namun konsumsi minyak difusi ini harus diperhatikan untuk waktu operasi dalam jangka waktu yang lama karena akan mengurangi volume minyak difusi di dalam pompa dan akan mengganggu operasi pompa (menurunkan kinerja pompa).

Contoh 2

Seperti contoh 1 tetapi diaplikasikan untuk proses plasma lucutan pijar (*glow discharge plasma*) yang digunakan untuk pembuatan lapisan tipis di dalam bejana vakum, setiap proses selama 10 menit pada tekanan kerja 10^{-2} mbar dan pada proses ini dengan 10 bejana. Tekanan kerja ini diatur dengan aliran gas menggunakan katup jarum (*needle valve*) dan tidak boleh melebihi 3 mbar liter/detik, pompa difusi yang digunakan untuk proses ini adalah DIF 250. Berdasarkan spesifikasi konsumsi minyak difusi untuk jenis pompa DIF 250 adalah 7×10^{-5} gram/mbar liter dan volume minyak difusi di dalam pompa adalah 300 cm^3 atau 240 gram (data spesifikasi teknis)[18], maka:

1. Jumlah gas yang harus dipompa setiap bejana adalah:
 $3 \text{ mbar liter/detik} \times (10 \times 60) \text{ detik/bejana} = 1800 \text{ mbar liter/bejana}$
2. Jumlah gas yang harus dipompa setiap hari untuk 10 bejana:
 $1800 \text{ mbar liter/bejana} \times 10 \text{ bejana} = 18000 \text{ mbar liter}$
3. Kebutuhan minyak difusi spesifik setiap hari:
 $18000 \text{ mbar liter} \times (7 \times 10^{-5} \text{ gram/mbar liter}) = 1,26 \text{ gram/hari}$
4. Jadi minyak difusi di dalam pompa akan habis selama:
 $240 \text{ gram}/(1,26 \text{ gram/hari}) = 190,48 \text{ hari} \approx 190 \text{ hari}$



Gambar 4.15. Tampang lintang pompa difusi [19].

Jadi minyak difusi di dalam pompa (240 gram) akan habis dalam waktu 190 hari. Hal ini sangat penting untuk diperhatikan karena dalam proses pemvakuman dengan pompa difusi akan dipengaruhi oleh kondisi minyak difusi baik jenis maupun jumlahnya serta kondisi pemanas dan pendinginnya. Untuk masing-masing jenis minyak difusi mempunyai karakteristik dan kemampuan pemvakuman yang berbeda, hal ini penting dalam hal pemilihan khususnya yang berhubungan dengan tingkat kevakuman akhir yang akan dicapai dalam pemvakuman. Adapun jenis-jenis minyak difusi yang banyak digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Jenis-jenis minyak difusi [19].

Jenis	NEOVAC SY	DC 702	DC 704	DC 705	Santovac 5
Deskripsi Kimia	Hidrokarbon sintetik	Silikon	Silikon murni	Silikon kemurnian tinggi	Campuran polyphenyl Ether
Komposisi Kimia	Mono-N alkyldiphenylether	Campuran phenyl-methyl-dimethyl	Tetramethyl-tetraphenyl-trisiloxane-cyclo-siloxane	Penta phenyl-trimethyl-trisiloxane	Campuran polyphenyl Ether
Kevakuman akhir - dengan trap (Torr)	$< 10^{-8}$	10^{-6}	$< 10^{-8}$	$< 10^{-8}$	$< 10^{-8}$
- tanpa trap (Torr)	1×10^{-11}	---	1×10^{-11}	1×10^{-11}	1×10^{-11}
Tekanan penguapan pada 25 °C (Torr)	1×10^{-8}	1×10^{-6}	2×10^{-8}	3×10^{-10}	1×10^{-9} pada 20 °C
Kekentalan pd 25 °C (cst)	25 pada 40 °C	45	39	175	2400
Berat molekul rata-rata	405	---	484	546	446
Temperatur pendidihan pada 0,5 Torr (°C)	220 pada 0,8 Torr	180	215	245	275
Titik nyala	230	193	221	243	288
Kevakuman akhir	sangat baik	kurang baik	sangat baik	baik sekali	baik sekali
Stabilitas panas	baik	baik sekali	baik sekali	baik sekali	sangat baik
Ketahanan oksidasi	baik	baik sekali	baik sekali	baik sekali	sangat baik
Kebersihan sistem	sangat baik	baik	sangat baik	sangat baik	baik sekali

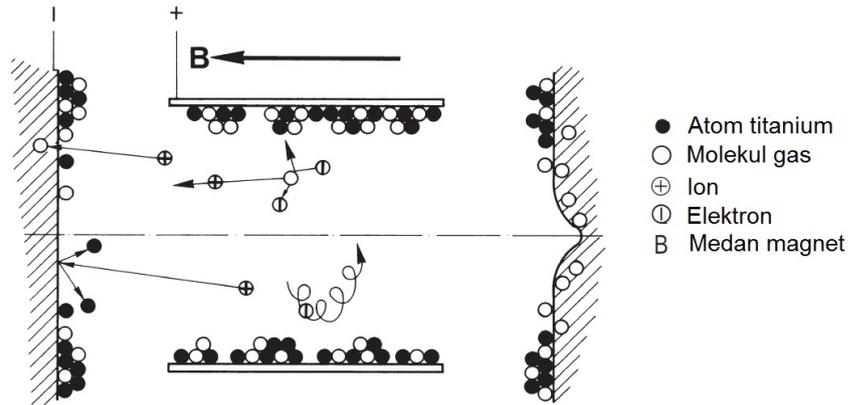
4.2. Pompa Vakum dengan Menjebak Gas

Berdasarkan klasifikasi (Gambar 4.1) jenis-jenis pompa yang termasuk dalam pompa vakum dengan penjebak (*entrainment*) gas dibagi menjadi 4 (empat) jenis yaitu: (1) pompa serapan, (2) pompa ion *getter*, (3) pompa ion *sputter* dan (4) pompa kriogenik. Untuk pompa serapan dari tekanan atmosfer sampai menengah, sedangkan ketiga jenis pompa lainnya mempunyai kemampuan dari tingkat kevakuman tinggi sampai sangat tinggi serta harus dilengkapi dengan pompa depan (*fore pump*) yaitu pompa sudu putar dan bahkan dengan pompa difusi. Hal ini diperlukan karena rentang operasinya antara 10^{-4} Torr hingga 10^{-14} Torr. Pada saat pompa dioperasikan (pompa ion *getter*, pompa ion *sputter* dan pompa kriogenik) tidak memerlukan pompa depan dan dioperasikan setelah kevakuman mencapai orde 10^{-4} Torr (Gambar 4.19). Perbedaan pompa ion *getter* dan pompa ion *sputter* adalah pada pembentukan uap titanium untuk menjebak molekul-molekul/atom-atom gas yang diionisasikan dan dideposisikan pada katode. Pembentukan uap ini dengan penguapan untuk pompa ion *getter* dan dengan percikan (*sputtering*) untuk pompa ion *sputter*. Khusus untuk pompa kriogenik, pompa depan akan dioperasikan jika proses regenerasi. Dari keempat pompa tersebut yang akan dibahas lebih rinci yaitu pompa ion *sputter* dan kriogenik.

4.2.1. Pompa ion *sputter*

Daerah operasi pompa ion *sputter* adalah pada daerah vakum tinggi dan sangat tinggi. Secara skematik pompa ini ditunjukkan pada Gambar 4.16. Untuk pengoperasian pompa ion *sputter* maka bejana yang divakumkan harus divakumkan hingga mencapai orde 10^{-4} Torr dan akan bekerja secara optimal setelah mencapai tingkat kevakuman orde 10^{-6} Torr [15]. Hal ini karena molekul-molekul/atom-atom gas yang dipompa tidak dikeluarkan dari pompa melainkan dideposisikan/ditempelkan pada dinding pompa khususnya (katode). Pompa ini mempunyai susunan katode-anode dan tegangan tinggi untuk mencatu katode-anode. Prinsip kerja dari pompa ini adalah dengan mengionkan molekul-molekul/atom-atom gas yang dipompa, selanjutnya ion-ion tersebut didorong dan dideposisikan ke katode sehingga ion-ion tersebut menempel pada permukaan katode. Agar ion-ion tersebut tidak lepas dari permukaan maka katode yang terbuat dari titanium dibombardir dengan ion

sehingga atom-atom titanium terpercik (ter-*sputter*) dan menutupi (mengubur) ion-ion yang dipompa pada permukaan katode. Karena molekul/atom yang dipompa tidak dikeluarkan dari pompa dan prosesnya mengionkan molekul-molekul/atom-atom yang dipompa maka mempunyai sifat laju pemompaan rendah dan umur pakai pompa dipengaruhi oleh jumlah molekul/atom yang dipompa. Dengan demikian makin tinggi tingkat kevakuman makin sedikit jumlah molekul/atom yang dipompa sehingga umur pompa akan lebih lama.

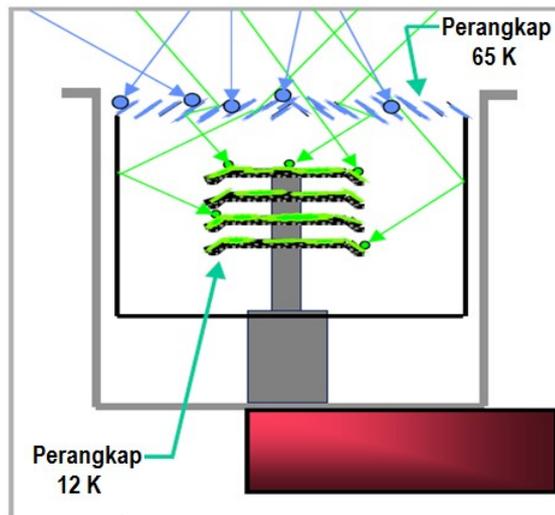
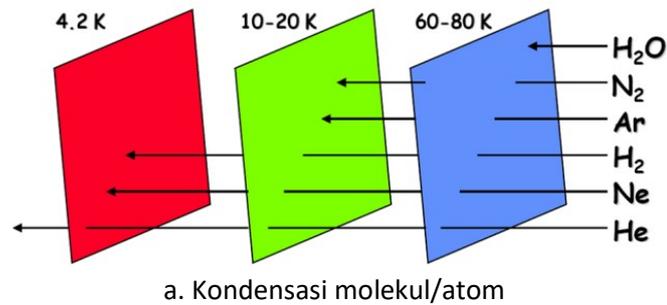


Gambar 4.16. Pompa ion [13].

4.2.2. Pompa kriogenik

Daerah operasi pompa kriogenik adalah pada daerah vakum tinggi dan sangat tinggi. Secara skematik pompa ini ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18. Gambar 4.17a menunjukkan temperatur kondensasi molekul/atom. Gambar tersebut menjelaskan bahwa molekul/atom saat melewati perangkat pada temperatur rendah, pada temperatur perangkat 60-80 K masih dapat menembus melewati perangkat. Untuk temperatur perangkat 10-20 K, molekul nitrogen (N_2) dan atom argon (Ar) terperangkap dan terkondensasi. Pada temperatur perangkat 4,2 K semua molekul maupun atom terperangkap dan kondensasi kecuali atom helium (He). Prinsip kerja pompa kriogenik ditunjukkan pada Gambar 4.17a. Untuk mencapai temperatur rendah digunakan sistem refrigerasi bertingkat yaitu (1) sistem refrigerasi biasa seperti *chiller* dan (2) refrigerasi menggunakan gas helium (He) sebagai bahan refrigeran. Dengan menggunakan bahan refrigeran helium (He)

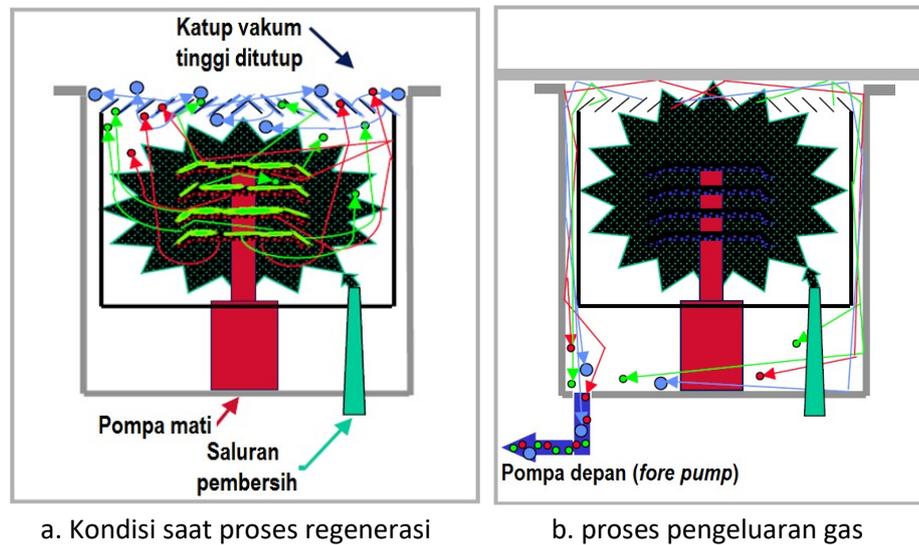
maka pada pompa kriogenik dapat mencapai temperatur perangkap yang terbuat dari arang sekitar 12 K. Pada pompa kriogenik (Gambar 4.17b) ditunjukkan bahwa ada 2 (dua) perangkap yaitu yang dipasang pada sisi masuk gas yang dipompa dan yang dipasang di dalam pompa.



Gambar 4.17. Pompa kriogenik [15].

Temperatur perangkap pertama (di sisi masuk pompa) adalah 65 K dan perangkap kedua (pada bagian dalam pompa) yaitu pada perangkap inti 12 K. Dengan 2 (dua) perangkap ini, molekul-molekul/atom-atom gas saat masuk ke pompa akan terkondensasi dan terperangkap pada perangkap yang terbuat dari arang. Dengan demikian molekul-molekul/atom-atom gas akan terpompa secara terus-menerus sehingga lama kelamaan akan terjadi kejenuhan dari

perangkat tersebut. Untuk mengatasi kejenuhan ini maka dilakukan regenerasi yaitu mengeluarkan molekul-molekul/atom-atom yang dipompa dan terkondensasi di dalam perangkat dengan cara memanaskan dan memvakumkan dengan pompa depan (pompa rotari) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.18.



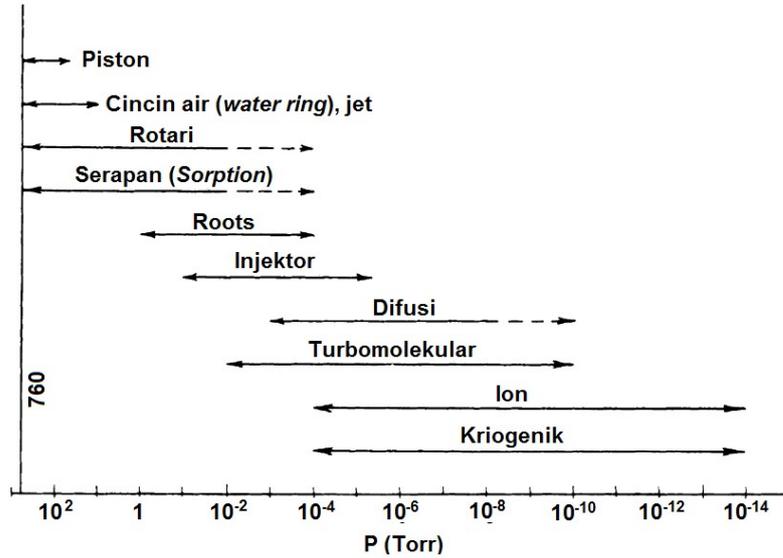
Gambar 4.18. Proses regenerasi pompa kriogenik [15].

Pada saat proses regenerasi, ditunjukkan bahwa molekul-molekul/atom-atom lepas dari perangkat sehingga sebelum proses regenerasi berlangsung katup vakum tinggi harus tertutup.

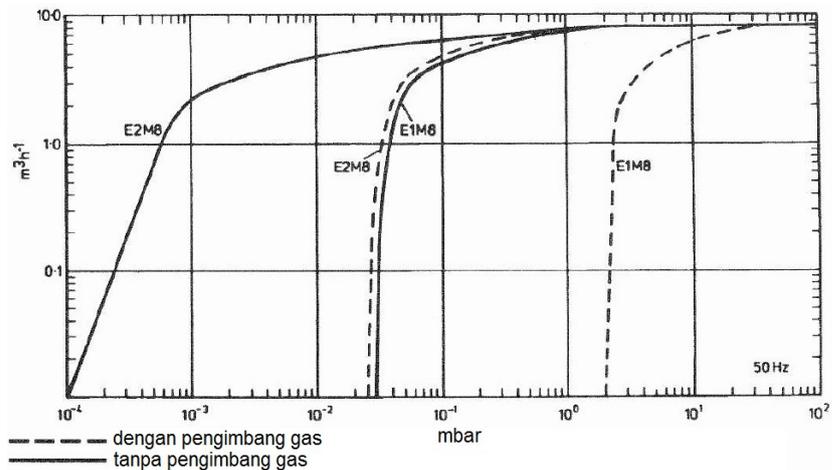
4.3. Daerah Tekanan Operasi Pompa dan Laju Pemompaan

Daerah tekanan operasi pompa dan laju pemompaan (*pumping speed*) suatu pompa merupakan hal yang sangat penting untuk diketahui. Daerah tekanan operasi pompa sebagai dasar pemilihan pompa yang akan digunakan dalam instalasi sistem vakum. Laju pemompaan sangat berkaitan dengan kinerja dari suatu pompa baik berhubungan dengan tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai maupun waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tingkat kevakuman tersebut. Daerah tekanan operasi untuk berbagai jenis pompa ditunjukkan pada Gambar 4.19. Adapun laju pemompaan sebagai fungsi

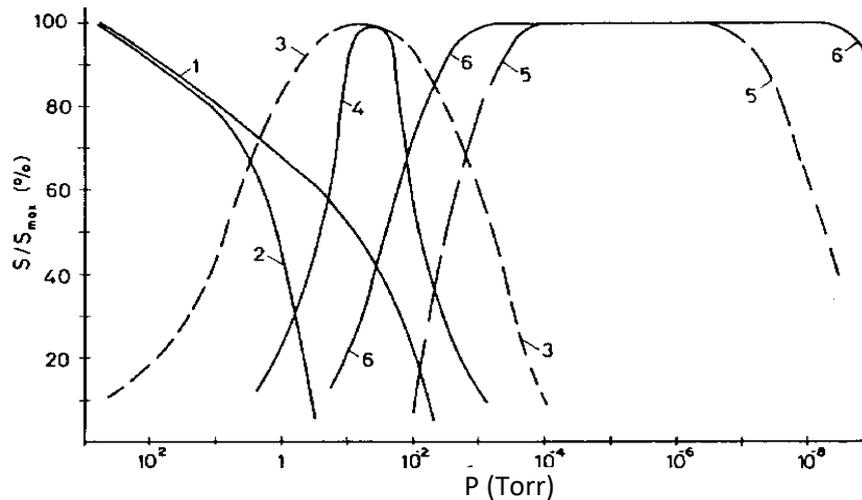
tekanan untuk pompa sudu putar ditunjukkan pada Gambar 4.20 dan pada Gambar 4.21 ditunjukkan kevakuman akhir sebagai fungsi laju pemompaan relatif untuk berbagai jenis pompa. Laju pemompaan relatif adalah laju pemompaan yang dihasilkan dibagi dengan laju pemompaan maksimum. Dengan memahami Gambar 4.19, Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 maka dapat dipilih jenis pompa yang akan digunakan pada suatu instalasi sistem vakum.



Gambar 4.19. Daerah tekanan operasi untuk berbagai jenis pompa [2].



Gambar 4.20. Laju pemompaan pompa sudu putar [20].



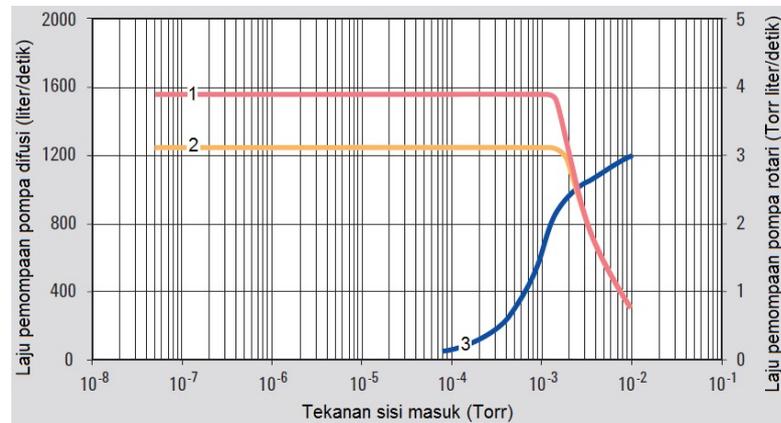
Keterangan:

- | | |
|--|---|
| 1. Pompa sudu putar 1 tingkat
(tanpa gas <i>ballast</i>) | 2. Pompa sudu putar 1 tingkat
(dengan gas <i>ballast</i>) |
| 3. Pompa Root | 4. Pompa injektor |
| 5. Pompa difusi | 6. Pompa Turbomolekular |

Gambar 4.21. Laju pemompaan untuk berbagai jenis pompa dibandingkan dengan kecepatan pemompaan maksimum [2].

Untuk menentukan pompa vakum yang digunakan perlu dipertimbangkan rentang daerah operasi pompa. Jika dalam instalasi sistem vakum dikehendaki sampai pada kevakuman orde 10^{-8} Torr, berdasarkan Gambar 4.19, Gambar 4.20, dan Gambar 4.21 dapat ditentukan pompa yang akan digunakan. Gambar 4.21 menunjukkan bahwa pompa rotari 1 tingkat mempunyai rentang operasi dari tekanan atmosfer hingga orde 10^{-2} Torr dan pompa Roots mempunyai rentang operasi tekanan 50 Torr hingga orde 10^{-4} Torr maka jika digabungkan diperoleh rentang operasi dari tekanan atmosfer hingga orde 10^{-4} Torr. Gambar 4.20 menunjukkan bahwa pompa rotari 2 tingkat mempunyai rentang operasi dari tekanan atmosfer hingga orde 10^{-4} Torr. Jadi untuk instalasi sistem vakum sampai pada kevakuman orde 10^{-8} Torr ada 2 (dua) pilihan pompa yang akan digunakan. Pilihan pertama menggunakan pompa rotari 1 tingkat, pompa Roots dan pompa difusi atau pompa turbomolekular. Pilihan kedua menggunakan pompa rotari 2 tingkat dan pompa difusi atau pompa turbomolekular, dengan penggunaan pompa ini akan diperoleh kinerja konstruksi pompa seperti yang ditunjukkan pada Gambar

4.22.. Dari beberapa pilihan tersebut yaitu pilihan kedua lebih menguntungkan karena: (1) pompa rotari 2 tingkat dapat menggantikan pompa rotari 1 tingkat dan pompa Root sehingga cukup menggunakan 2 pompa vakum dan konstruksi lebih sederhana serta kompak, (2) ruangan yang diperlukan lebih kecil, (3) biaya akan lebih murah.



Keterangan:

1. Pompa difusi dengan perangkat pendingin
2. Pompa difusi tanpa perangkat pendingin
3. Pompa rotari

Gambar 4.22. Laju pemompaan instalasi pompa rotari dan difusi [19].

V. ALAT UKUR KEVAKUMAN

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. Contoh pengukuran secara tidak langsung misalnya pengukuran tekanan (kevakuman) menggunakan tahanan listrik (filamen) sehingga hasil pengukuran perubahan tekanan (kevakuman) berupa data perubahan arus listrik. Dari pengukuran tersebut diperlukan pengolahan data untuk mengkonversi data perubahan arus listrik menjadi data perubahan tekanan (kevakuman). Penggolongan pengukuran secara langsung ditunjukkan pada Gambar 5.1, sedangkan untuk penggolongan pengukuran secara tidak langsung ditunjukkan pada Gambar 5.2. Adapun daerah pengukuran untuk masing-masing jenis manometer ditunjukkan pada Gambar 5.3. Masing-masing jenis manometer tersebut mempunyai dasar kerja dan jangkauan pengukuran yang berbeda. Beberapa jenis alat ukur kevakuman meliputi: manometer Bourdon, manometer pipa U, manometer Mc-Leod, manometer pirani, manometer ionisasi katoda panas, dan manometer katode dingin (Penning).

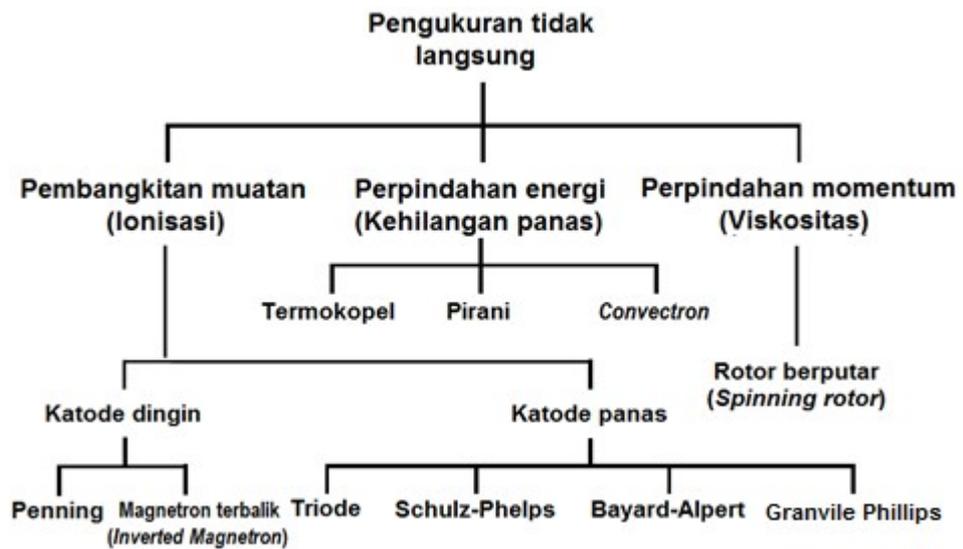
5.1. Manometer Pengukuran Langsung

Berdasarkan klasifikasi (Gambar 5.1) 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

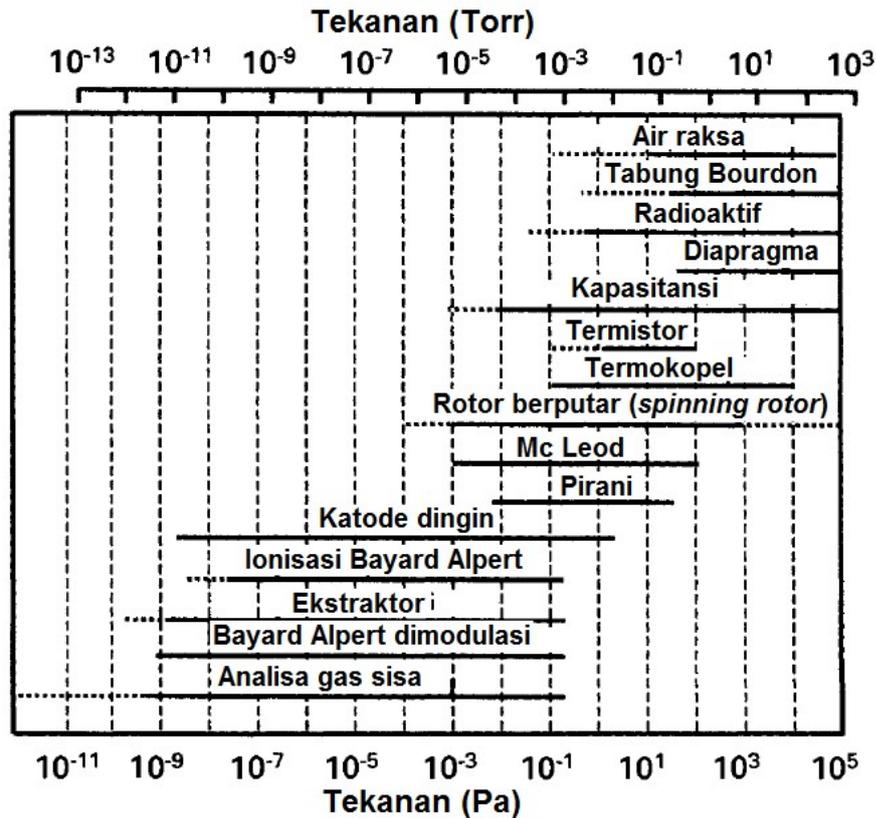
kapasitansi. Untuk manometer dengan prinsip kerja menggunakan cairan meliputi: manometer pipa-U dan manometer McLeod. Namun untuk manometer kapasitansi tidak diuraikan lebih detail.



Gambar 5.1. Penggolongan pengukuran secara langsung [15].



Gambar 5.2. Penggolongan pengukuran secara tidak langsung [15].

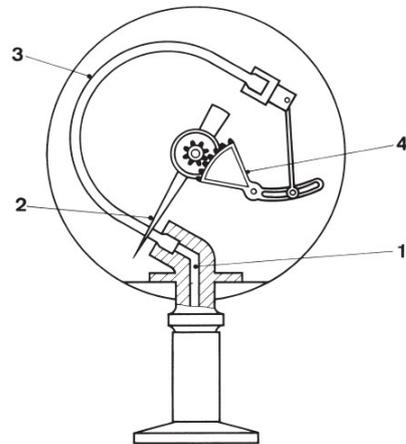


Gambar 5.3. Daerah pengukuran berbagai jenis manometer [13].

5.1.1. 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 5.4. Daerah pengukurannya untuk rentang kevakuman antara 10^3 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

positip/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.



1. Penghubung tabung Bourdon ke flens
2. Jarum pengukur
3. Tabung Bourdon
4. Lengan pengukur

Gambar 5.4. Manometer Bourdon [13].

5.1.2. 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

$$P = \rho g h \tag{5.1}$$

atau

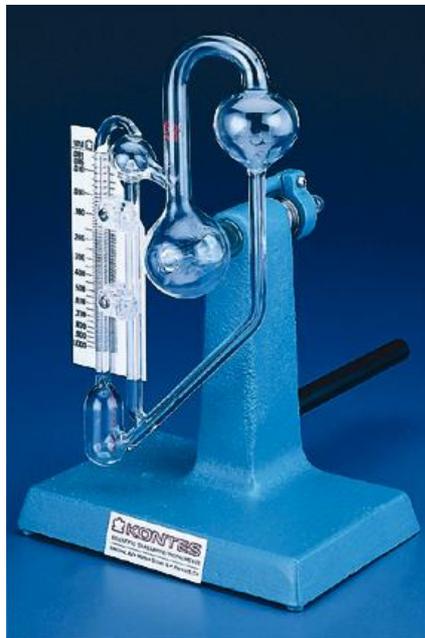
$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} \tag{5.2}$$

dengan P adalah tekanan, ρ rapat jenis cairan yang digunakan, h tinggi kolom cairan dan g gravitasi. Jadi dengan persamaan (5.1) atau (5.2), tekanan dapat dinyatakan dengan ketinggian kolom cairan (h). Cairan yang digunakan

biasanya air raksa (Hg), daerah pengukurannya $10^3 - 10^{-1}$ 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.

5.1.3. Manometer McLeod

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 5.5, karena prinsip kerjanya didasarkan pada pemampatan gas maka tidak digunakan untuk gas-gas yang terkondensasi.



Gambar 5.5. Manometer McLeod [21].

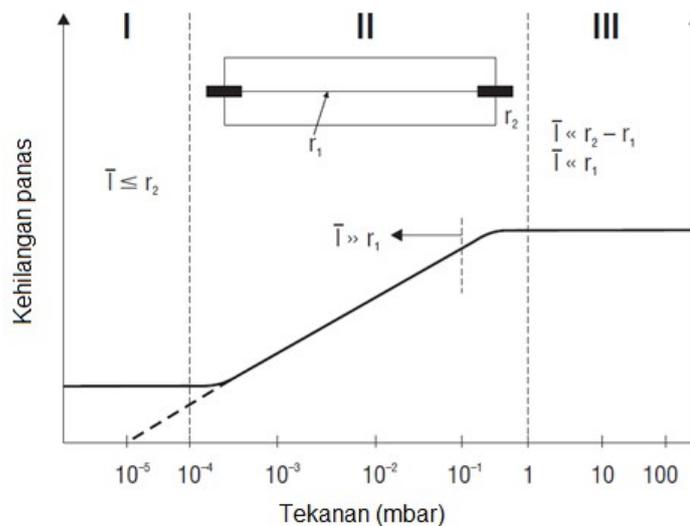
Walaupun manometer ini ditemukan di abad 19 (tahun 1875) sampai sekarang masih banyak digunakan, bahkan juga digunakan standar primer [4].

5.2. Manometer Pengukuran Tidak Langsung

Berdasarkan klasifikasi (Gambar 5.2) 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*). Dari beberapa manometer tersebut hanya beberapa yang akan diuraikan.

Untuk manometer yang prinsip kerjanya berdasarkan perpindahan energi (kehilangan panas), hal penting yang harus diketahui yaitu hubungan proses perpindahan panas terhadap tekanan atau kevakuman. Di dalam ruang vakum ada 3 (tiga) daerah yang mempengaruhi perpindahan panas, 3 (tiga) daerah ini ditunjukkan pada Gambar 5.6 dan Gambar 5.7. Berdasarkan gambar tersebut, pada daerah (I) adalah daerah tekanan sangat rendah atau vakum tinggi maupun sangat tinggi, (II) adalah daerah vakum sedang dan (III) adalah daerah tekanan tinggi atau vakum rendah bahkan sangat rendah atau atmosfer. Daerah perpindahan panas yang sangat dipengaruhi oleh tekanan adalah pada daerah (II). Daerah ini adalah daerah kerja manometer yang prinsip kerjanya didasarkan perpindahan energi (kehilangan panas) yaitu manometer termokopel, manometer pirani dan manometer *convectron*. Pada daerah (I) laju perpindahan energi (panas) didominasi secara radiasi yaitu pancaran energi dari permukaan panas dari sensor ke permukaan dingin dari dinding bagian dalam rumah manometer pirani. Hal ini karena pada vakum tinggi bahkan sangat tinggi maka kerapatan molekul/atom sangat rendah dan jumlah molekul/atom yang bergerak secara molekular sangat rendah. Dengan demikian jumlah perpindahan energi melalui molekul/atom yang bergerak secara molekular dengan menumbuk permukaan panas (permukaan sensor) dan menghantarkan panas ke permukaan dingin sangat sedikit. Akibatnya laju perpindahan panas secara konduksi sangat kecil. Pada daerah (II) laju

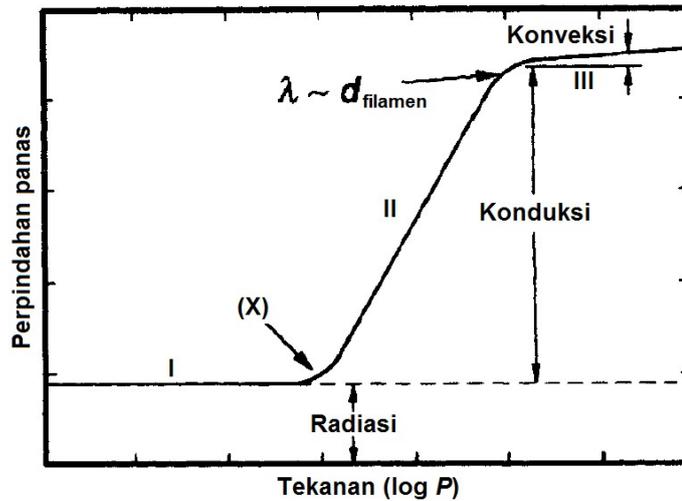
perpindahan energi (panas) didominasi baik secara radiasi maupun konduksi. Pada daerah ini kondisi molekul/atom pada kondisi transisi maupun kondisi molekular. Kondisi transisi yaitu perubahan dari kondisi kental (*viscous*) ke kondisi molekular. Dengan demikian, kerapatan molekul/atom cukup tinggi sehingga jumlah molekul/atom yang memindahkan energi dari permukaan panas (permukaan sensor) ke permukaan dingin (dinding bagian dalam rumah pirani) melalui gerakan molekular cukup tinggi. Akibatnya laju perpindahan panas secara konduksi cukup besar. Pada daerah (III) yaitu pada kondisi tekanan tinggi atau vakum rendah bahkan sangat rendah sehingga kondisi gas adalah pada kondisi kental (*viscous*). Pada kondisi ini gerakan molekul/atom secara laminar atau turbulen. Karena gerakan molekul secara laminar atau turbulen maka perpindahan panas yang terjadi secara konveksi. Dari uraian ini dapat disimpulkan bahwa manometer dengan prinsip kerja perpindahan energi (kehilangan panas) mempunyai kepekaan pada daerah II sehingga rentang pengukuran yang baik adalah mulai kevakuman 1 Torr hingga mencapai orde 10^{-4} Torr.



Keterangan

- (I) Perpindahan panas dengan cara radiasi dan konduksi
- (II) Perpindahan panas sangat dipengaruhi tekanan
- (III) Perpindahan panas dengan cara radiasi dan konveksi

Gambar 5.6. Hubungan kehilangan panas sebagai fungsi tekanan [13].



Keterangan

(I) $\lambda \gg d_{\text{kawat}}$ (II) daerah menengah dan (III) $\lambda \ll d_{\text{kawat}}$

(X) adalah batas daerah pengukuran pada tekanan rendah

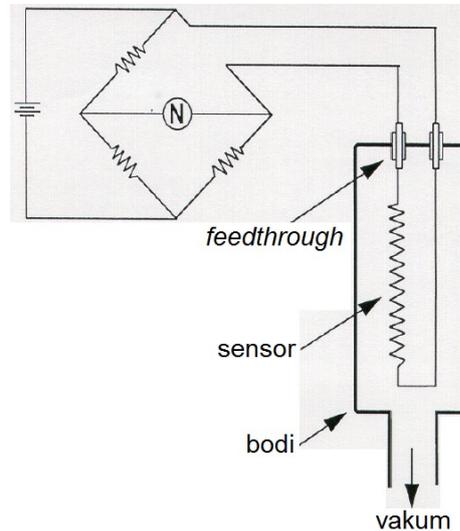
Gambar 5.7. Hubungan perpindahan panas sebagai fungsi tekanan [4].

5.2.1. Manometer pirani

Dasar kerja manometer pirani menggunakan hantaran panas dan proses penunjukannya menggunakan rangkaian luar secara elektronik. Rangkaian sensor manometer ini ditunjukkan pada Gambar 5.8, 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. Besar kehilangan panas dipengaruhi oleh besar tekanan di dalam bodi manometer pirani seperti ditunjukkan pada Gambar 5.6. Pada umumnya manometer pirani 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 5.1. Faktor koreksi ini disebabkan karena untuk masing-masing jenis molekul/atom gas mempunyai besaran pemindahan panas dari filamen sebagai sensor ke dinding

rumah manometer pirani yang berbeda sehingga tekanan sesungguhnya (P) adalah [12]

$$P = P_{\text{terbaca}} \times \text{faktor koreksi.} \quad (5.3)$$



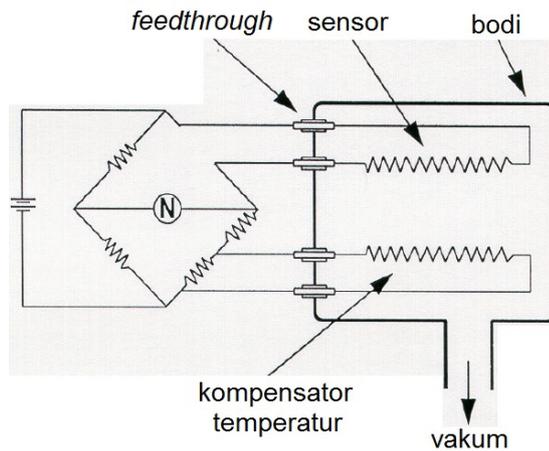
Gambar 5.8. Rangkaian sensor manometer pirani [15].

5.2.2. Manometer *convectron*

Dasar kerja manometer *convectron* sama dengan manometer pirani. Perbedaan dengan manometer pirani terletak pada tambahan kompensator temperatur (Gambar 5.9). 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 5.1). Faktor koreksi ini disebabkan karena untuk masing-masing jenis molekul/atom gas mempunyai besaran pemindahan panas dari filamen sebagai sensor ke dinding rumah manometer *convectron* yang berbeda sehingga tekanan sesungguhnya (P) adalah [12]

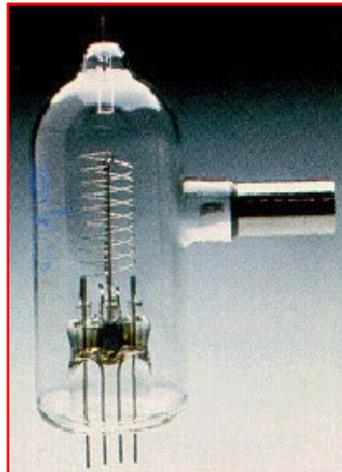
$$P = P_{\text{terbaca}} \times \text{faktor koreksi.} \quad (5.4)$$



Gambar 5.9. Rangkaian sensor manometer *convectron* [15].

5.2.3. Manometer Ionisasi Katode Panas

Dasar kerjanya adalah ionisasi gas menggunakan katoda yang dipanaskan, proses penunjukannya seperti pada manometer pemindahan energi (manometer pirani dan manometer *convectron*) yaitu menggunakan rangkaian luar secara elektronik. Dalam penggunaannya juga ada ketergantungan terhadap jenis gas yang diukur. Hal ini karena energi ionisasi dari tiap-tiap molekul/atom gas di dalam sistem vakum tidak sama. Berdasarkan Gambar 5.2, manometer ionisasi katode panas ada beberapa jenis misalnya: (1) manometer Bayard-Alpert dan (2) manometer Granville Phillips (Gambar 5.10). Daerah pengukurannya antara 10^{-2} Torr sampai 10^{-9} Torr. Proses ionisasi yang mendasari prinsip kerja manometer ionisasi ditunjukkan pada Gambar 5.11.

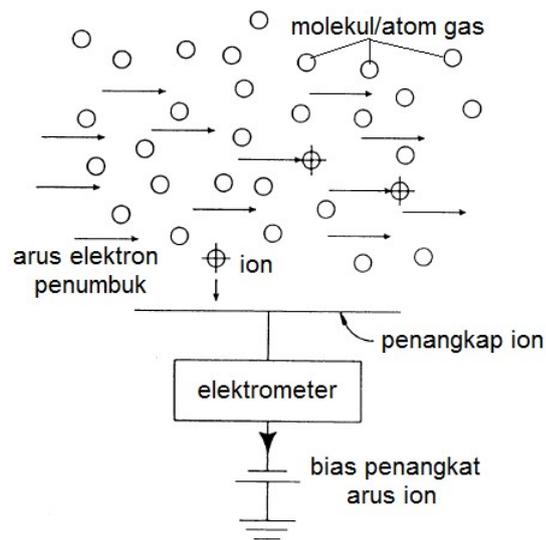


(a) manometer Bayard-Alpert



(b) manometer Granville Phillips

Gambar 5.10. Manometer ionisasi katode panas [15].



Gambar 5.11. Proses ionisasi pada manometer ionisasi [15].

Pada manometer ionisasi katode panas, proses ionisasi dengan tumbukan elektron yaitu elektron bebas yang dihasilkan oleh katode panas diberi tambahan energi agar mempunyai energi yang cukup untuk mengionisasi

molekul/atom gas di dalam manometer. Proses ionisasi ini ditunjukkan pada Gambar 5.11. Gambar 5.11 menjelaskan bahwa elektron bergerak dengan energi tertentu dan menumbuk molekul/atom, karena tumbukan tersebut elektron terluar dari molekul/atom akan terlepas sehingga terjadi proses ionisasi. Selanjutnya ion-ion hasil proses ionisasi diarahkan ke penangkap ion (katode) dan diukur dengan elektrometer. Pada kondisi ini rapat molekul/atom gas berbanding lurus dengan tekanan, sedangkan proses ionisasi berbanding lurus dengan rapat molekul/atom gas. Jadi jumlah ion yang tertangkap oleh penangkap ion berbanding lurus dengan tekanan. Dari jumlah ion yang tertangkap oleh penangkap ion diukur menggunakan elektrometer dalam bentuk arus ion yang berbanding lurus dengan tekanan. Dengan demikian besar arus ion akan diolah dan dikonversi menjadi tekanan oleh perangkat elektronik, sehingga besaran hasil pengukuran sudah ditampilkan dalam bentuk tekanan yang dapat dibaca secara langsung. Dasar prinsip kerja ini digunakan semua manometer ionisasi baik untuk manometer Bayard-Alpert, manometer Granville Phillips maupun manometer Penning. Perbedaan untuk manometer Penning (termasuk manometer katode dingin) adalah elektron bebas diperoleh dari radiasi kosmis atau elektron bebas yang ada pada gas tersebut (bukan oleh emisi katode panas).

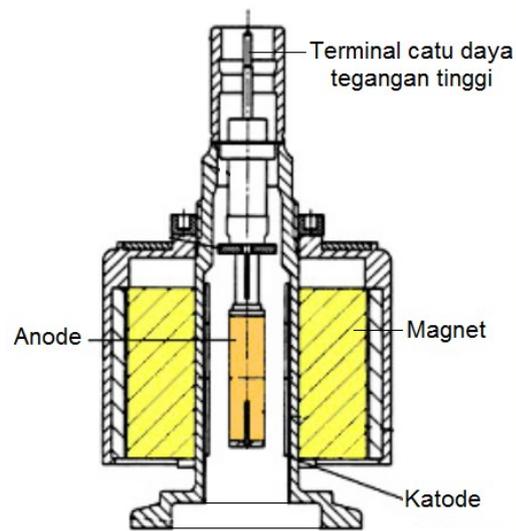
Pada umumnya manometer ini dikalibrasi untuk pengukuran kevakuman dengan udara, sehingga untuk memperoleh pembacaan tekanan yang sebenarnya untuk gas selain udara harus dikalikan dengan faktor koreksi yang besarnya ditunjukkan pada Tabel 5.2. Besar tekanan sesungguhnya ditentukan dengan persamaan[12]

$$P = P_{\text{terbaca}} \times \text{faktor koreksi.} \quad (5.1)$$

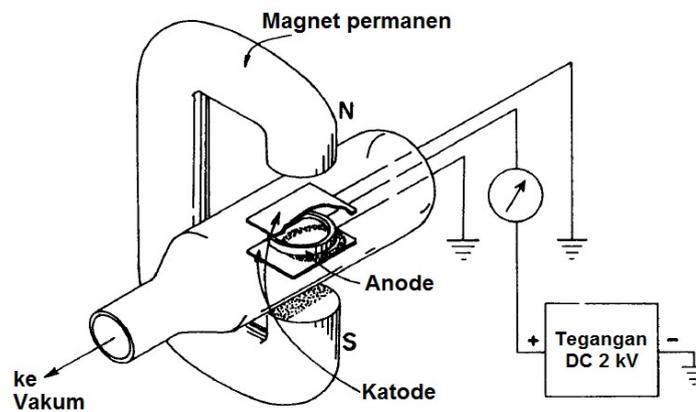
5.2.4. Manometer Penning

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 katode dingin. Bentuk visual dan bagian utama manometer ini ditunjukkan pada Gambar 5.12 dan Gambar 5.13. Dasar konstruksinya (Gambar 5.12) cukup sederhana dengan komponen utama: katode, anode, magnet permanen, dan terminal catu daya. Adapun cara kerjanya ditunjukkan pada Gambar 5.13 yang prinsip kerjanya berdasarkan proses ionisasi (Gambar

5.11). 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 5.12. Tampang lintang manometer Penning [22].



Gambar 5.13. Skema manometer Penning [15].

Untuk mengetahui besar tekanan yang diukur diindikasikan dengan arus lucutan (arus ionisasi). Sesuai Gambar 5.3, daerah pengukuran manometer Penning setelah dikembangkan 10^{-1} - 10^{-9} Torr dan penggunaannya sama seperti pada manometer ionisasi katoda panas termasuk untuk menentukan tekanan sesungguhnya.

Tabel 5.1. Faktor koreksi manometer perpindahan energi [12].

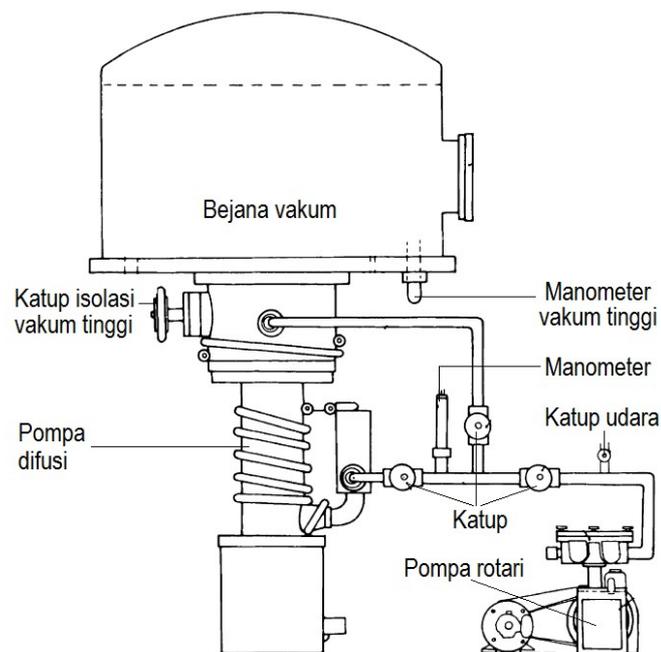
Gas	Faktor koreksi	Gas	Faktor koreksi
Nitrogen	1,0	Helium	1,0
Hidrogen	0,77	Neon	1,1
Karbon Monoksida	1,0	Argon	1,4
Gas Asam Arang	0,9	Krypton	2,2
Uap Air Raksa	2,9	Xenon	2,8

Tabel 5.2. Faktor koreksi manometer ionisasi [13].

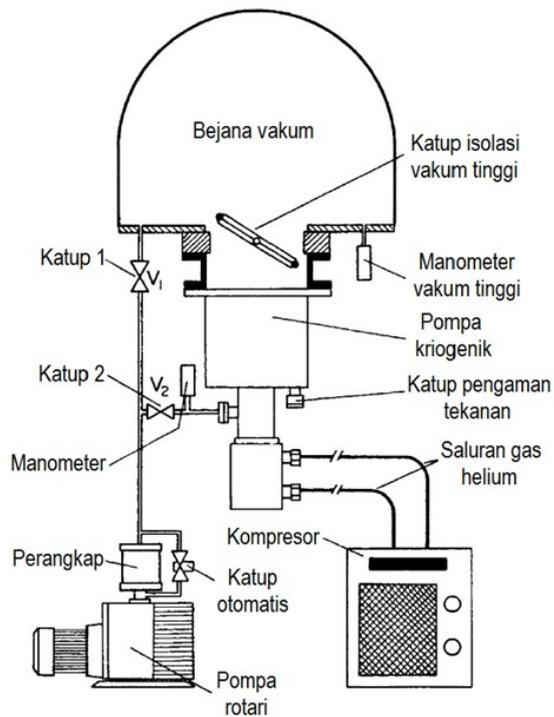
Gas	Faktor koreksi	Gas	Faktor koreksi
Nitrogen	1,0	Uap air raksa	0,303
Helium	6,9	Hidrogen	2,4
Neon	4,35	Argon	0,75
Argon	0,83	Karbon monoksida	0,92
Krypton	0,59	Karbon dioksida	0,69
Xenon	0,33	Metana	0,8

VI. INSTALASI SISTEM VAKUM

Dalam instalasi sistem vakum, ada beberapa hal yang harus diperhatikan antara lain sistem aliran, beban gas yang dipompa, waktu pemompaan yang diperlukan, jenis dan ukuran pompa yang digunakan dan tingkat kehampaan yang akan dicapai. Untuk mencapai kehampaan tinggi harus menggunakan 2 (dua) pompa yaitu pompa depan misalnya pompa rotari dengan pompa vakum tinggi misalnya pompa difusi, pompa turbomolekular, pompa kriogenik dan pompa ionik. Pemilihan pompa yang digunakan akan mempengaruhi instalasinya sebagai contoh: (1) instalasi sistem vakum tinggi menggunakan pompa rotari dan pompa difusi atau turbomolekular (Gambar 6.1) dan (6.2) instalasi vakum tinggi menggunakan pompa rotari dan pompa kriogenik (Gambar 6.2). Contoh pemilihan jenis tersebut akan mempengaruhi susunan instalasi pompa.



Gambar 6.1. Instalasi pompa rotari dan pompa difusi [2].



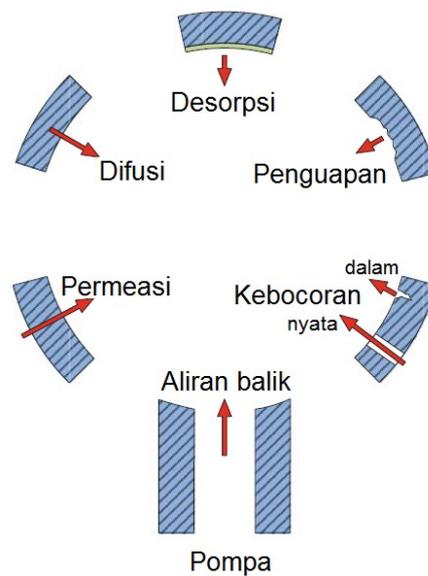
Gambar 6.2. Instalasi pompa rotari dan pompa kriogenik [23].

Untuk pompa depan dengan pompa rotari dan pompa vakum tinggi dengan pompa difusi maka pompa rotari akan beroperasi selama pompa difusi beroperasi karena pompa difusi pengoperasiannya harus didukung dengan pompa rotari. Sedangkan untuk pompa rotari dan pompa vakum tinggi dengan pompa kriogenik maka pompa rotari akan beroperasi untuk memvakumkan pompa kriogenik dan bejana vakum hingga pompa kriogenik dapat beroperasi. Selanjutnya pompa rotari dimatikan dan akan dioperasikan jika diperlukan yaitu misalnya untuk regenerasi pompa kriogenik.

6.1. Beban Gas Dalam Sistem Instalasi Vakum

Dalam sistem instalasi vakum, pada saat pemvakuman awal maka pompa depan (pompa rotari) bekerja untuk mengeluarkan udara/gas dari tekanan atmosfer sampai kevakuman maksimum yang dapat dicapai. Pada

saat kevakuman mencapai tingkat tertentu ada beberapa gas yang masuk ke dalam sistem menjadi beban gas yang harus dipompa. Jadi beban gas yang harus dipompa tidak hanya sisa udara/gas yang dipompa dari tekanan atmosfer, tetapi ditambah beberapa gas yang masuk ke dalam sistem vakum. Beban gas di dalam sistem vakum ini meliputi: (1) gas yang ada di dalam sistem sebelum dipompa, (2) gas yang masuk karena adanya kebocoran, (3) gas yang disebabkan adanya pelepasan gas (*outgassing*) dari permukaan bahan yang ada di dalam sistem, (4) gas yang disebabkan adanya penguapan dari bahan yang ada di dalam sistem dan (5) gas yang masuk dengan cara permeasi melalui dinding. Secara skematik beban gas dalam sistem vakum ditunjukkan pada Gambar 6.3.



Gambar 6.3. Skema beban gas dalam sistem vakum [4].

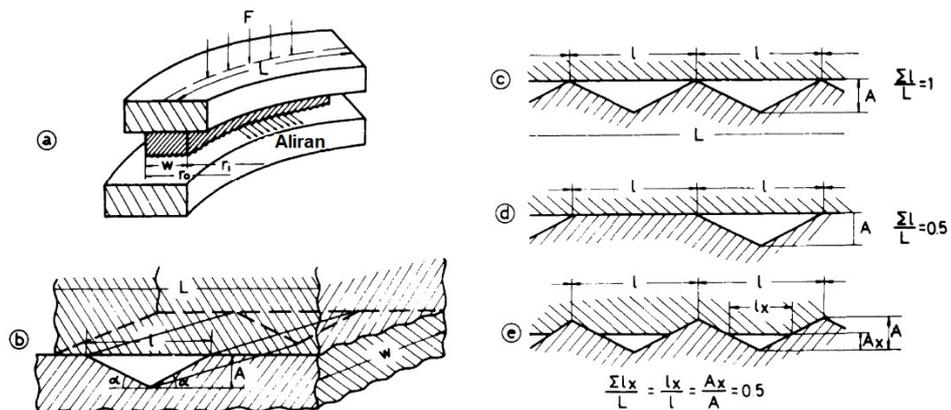
6.1.1. Gas yang ada di dalam sistem sebelum dipompa (*V*)

Pada awal pemompaan beban gas sesuai dengan volume ruangan sistem instalasi sistem vakum itu sendiri dan biasanya mulai dari tekanan atmosfer jika sistem tersebut belum divakumkan, namun jika sudah

divakumkan terlebih dahulu tergantung dari tingkat kevakuman yang telah dicapai pada saat sistem akan dipompa (divakumkan).

6.1.2. Gas yang masuk karena adanya kebocoran (Q_L)

Kebocoran pada sistem hampa terjadi pada sambungan komponen-komponen yang digunakan di dalam sistem hampa. Sambungan komponen-komponen ini dibedakan menjadi 2 bagian yaitu sambungan tidak dapat dilepas dan sambungan dapat dilepas. Sambungan tidak dapat dilepas yaitu sambungan dengan las dan sambungan dengan *brazing*. Pada sambungan ini kebocoran yang terjadi sangat sulit ditentukan karena sangat tergantung dari kualitas sambungan tersebut. Untuk sambungan dapat dilepas yaitu sambungan dengan perapat (*seal*) baik dari bahan logam maupun viton ditunjukkan pada Gambar 6.4. Jenis logam yang banyak digunakan sebagai perapat adalah tembaga, aluminium, indium atau emas.



Keterangan

- a. kontak permukaan anulus
- b. lintasan kebocoran
- c. kontak permukaan
- d. beban kontak antar muka
- e. lintasan tunggal pada permukaan

Gambar 6.4. Sambungan dengan perapat logam dan viton [2].

Dalam sambungan dengan perapat logam, logam yang digunakan sebagai perapat tersebut akan mengalami deformasi plastis sehingga jika

dilepas perapat tersebut tidak dapat kembali ke bentuk semula. Jadi perapat logam tidak dapat digunakan berulang kali. Untuk menentukan besar laju kebocoran dihitung dengan menentukan daya hantar perapat sehingga menimbulkan terjadinya kebocoran. Besar daya hantar pada perapat (Gambar 6.4) ditentukan dengan persamaan [2]

$$C = 19,3 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \frac{A^2}{2 (1 + 1/\cos \alpha) \operatorname{tg} \alpha} \frac{Y}{w} \quad (6.1)$$

dengan C daya hantar (liter/detik), A (cm), Y faktor koreksi

Untuk sambungan dengan perapat viton, viton yang digunakan sebagai perapat tersebut akan mengalami deformasi elastis sehingga jika sambungan dilepas bentuk perapat tersebut akan kembali ke bentuk semula. Dengan demikian perapat viton dapat digunakan berulang-ulang. Besarnya daya hantar pada perapat viton dapat ditentukan dengan persamaan [2]

$$C = 4 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} A^2 \frac{L}{W} \exp \left(- \frac{3F}{L w R} \right) . \quad (6.2)$$

Selanjutnya besarnya laju kebocoran (Q_L) baik dengan perapat logam maupun viton dapat ditentukan dengan persamaan [2]

$$Q_L = C \cdot \Delta P \quad (6.3)$$

Untuk laju kebocoran melalui *seal* (*O ring*) standar dan diketahui laju kebocoran spesifik maka laju kebocoran dapat ditentukan dengan persamaan [2]

$$Q_L = q_L' \cdot L \quad (6.4)$$

6.1.3. Gas yang disebabkan adanya pelepasan gas (*outgassing*) (Q_D)

Beban gas ini disebabkan oleh adanya pelepasan gas (*outgassing*) dari permukaan bahan yang ada di dalam sistem. Hal ini disebabkan karena kekasaran permukaan bahan sehingga pada saat tidak divakumkan (kevakuman rendah) terjadi penyerapan molekul-molekul/atom-atom gas pada permukaan tersebut atau kotoran yang menempel pada permukaan.

Kemudian pada saat kevakuman tinggi molekul-molekul/atom-atom ini melepaskan diri dari permukaan bahan di dalam sistem vakum. Seperti pada Gambar 6.3, pelepasan gas terdiri dari difusi dan desorpsi. Difusi adalah molekul/atom yang menempel pada permukaan dinding vakum dan dilanjutkan masuk ke permukaan secara difusi, saat divakumkan molekul/atom tersebut kembali melepaskan dari permukaan. Desorpsi adalah molekul/atom tersebut menempel dan melapisi permukaan (tidak sampai masuk di permukaan), setelah divakumkan maka akan lepas dari permukaan. Untuk mempercepat laju pelepasan gas tersebut dilakukan dengan pemanasan.

Jumlah gas yang disebabkan oleh pelepasan gas ini tergantung pada temperatur, bentuk, jenis bahan yang digunakan dan pengolahan permukaan (kekasaran, pembersihan dan sebagainya). Laju pelepasan gas dapat ditentukan dengan pendekatan eksperimen sesuai persamaan [2]

$$K_h = K_u + \frac{K_1}{t_h^\gamma} \quad (6.5)$$

dan

$$t_h^\gamma = t_h^{1/2} - 1/2 \xi^{1/2} \left[1 - \exp\left(\frac{t_h}{2\xi}\right) \right] \quad (6.6)$$

untuk $\xi > 10^4$ jam, nilai t_h^γ adalah

$$t_h^\gamma = \frac{\xi}{4} \quad (6.7)$$

dan

$$\xi = \frac{\pi h_o^2}{5,76 \cdot 10^4 D_1} \quad (6.8)$$

dengan K_h laju pelepasan gas spesifik pada h jam setelah pompa dioperasikan, K_1 laju pelepasan gas spesifik setelah pompa dioperasikan selama 1 jam, t_h waktu setelah pompa dioperasikan, γ konstanta yang berkaitan dengan bahan, ξ konstanta waktu difusi dan D_1 koefisien difusi. Nilai K_1 dan K_u dihitung dengan persamaan [2]

$$K_1 = \left[\frac{2,79 \cdot 10^{-3}}{3600^{\gamma_1}} \right] T \varepsilon_o \left(\frac{D_1}{\pi} \right)^{1/2} \quad (6.9)$$

dan

$$K_u = 2,79 \cdot 10^{-3} T \left(\frac{D_1 b}{h_o} \right) P_o \quad (6.10)$$

dengan ε_o konsentrasi gas ketika $t_h = 0$, T temperatur dinding pada saat operasi, $D_1 b$ konstanta permeasi, h_o tebal dinding dan P_o tekanan parsial gas di bagian luar dinding.

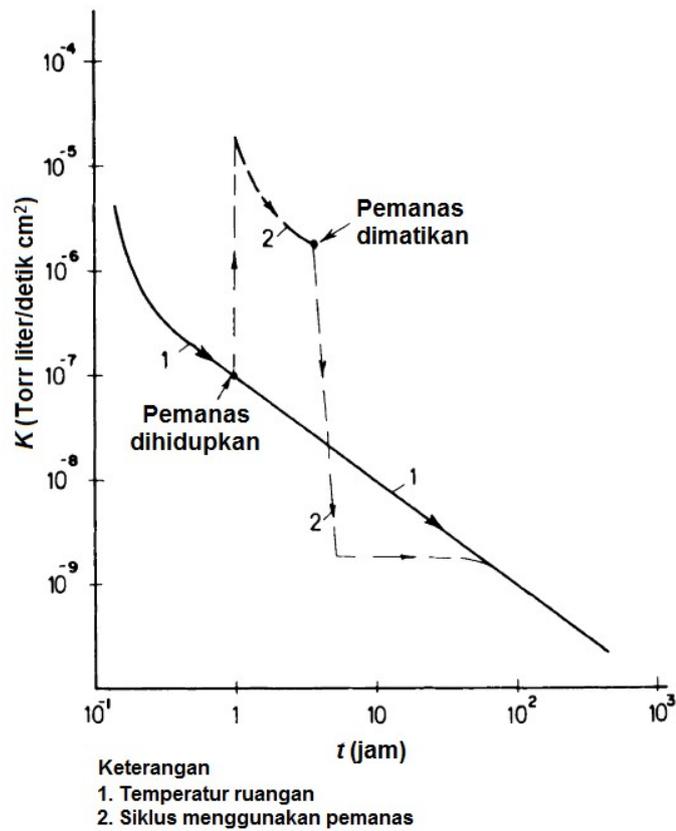
Besar laju pelepasan gas yang terjadi (Q_D) dapat ditentukan dengan persamaan

$$Q_D = q_D A \quad (6.11)$$

dengan $q_D = K_h$ laju pelepasan gas spesifik dan A adalah luas permukaan di dalam sistem vakum. Laju pelepasan gas dalam sistem vakum dapat dipercepat dengan cara melakukan pemanasan (*bake*), untuk menjelaskan proses ini diilustrasikan pada Gambar 6.5. Jika tanpa pemanasan (*bake*) maka laju pelepasan gas terjadi penurunan secara perlahan-lahan mengikuti garis (1). Namun apabila menggunakan siklus pemanasan, laju pelepasan gas akan mengikuti garis (2). Saat pemanas dihidupkan terjadi kenaikan laju pelepasan gas yang sangat besar. Kemudian temperatur pemanas akan stabil (*steady state*) maka laju pelepasan gas akan turun secara eksponensial. Setelah terjadi penurunan secara eksponensial maka pemanas dimatikan sehingga akan terjadi penurunan laju pelepasan gas yang sangat besar dan selanjutnya akan menuju ke kondisi normal setelah mencapai temperatur ruangan.

6.1.4. Gas yang disebabkan adanya penguapan (Q_V)

Beban gas akibat penguapan ini disebabkan adanya bahan-bahan di dalam sistem yang dapat menguap biasanya karena kevakuman tinggi atau sangat tinggi. Hal ini karena pada kondisi tekanan yang sangat rendah (vakum sangat tinggi) temperatur penguapan bahan akan turun. Di samping itu, ada kemungkinan karena ketidakbersihan permukaan peralatan atau di dalam sistem vakum terdapat bahan yang dapat menguap pada tekanan sangat rendah (misalnya minyak, air maupun material yang digunakan untuk membuat komponen-komponen sistem vakum). Besar laju penguapan tergantung dari bahan yang ada di dalam sistem instalasi vakum tersebut.



Gambar 6.5. Laju pelepasan gas sebagai fungsi waktu [2].

Untuk bahan-bahan tersebut, penguapan akan terjadi bila tekanan parsial yang mengenai permukaan lebih kecil dari tekanan penguapannya. Jumlah penguapan yang terjadi dapat ditentukan dengan persamaan [2]

$$W = 5,83 \cdot 10^{-2} P_v \left(\frac{M}{T} \right)^{1/2} f \quad (6.12)$$

dengan W jumlah bahan yang menguap ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$), P_v tekanan penguapan bahan (Torr), M berat molekul bahan, T temperatur bahan dalam (K) dan f koefisien *sticking*.

Dengan mengetahui jumlah bahan yang menguap (W) maka dapat dihitung volume per satuan waktu pada kehampaan tersebut dari penguapan

yang menyebabkan sumbangan beban gas pada pompa. Besar sumbangan beban gas dari penguapan (V) ini adalah [2]

$$V = \frac{W}{M} \frac{N_A}{n} \quad (6.13)$$

dan

$$n = \frac{P}{k T} \quad (6.14)$$

sehingga didapatkan

$$V = \frac{W}{M} \frac{N_A k T}{P} \quad (6.15)$$

Dengan demikian beban gas akibat penguapan (Q_V) dapat dituliskan

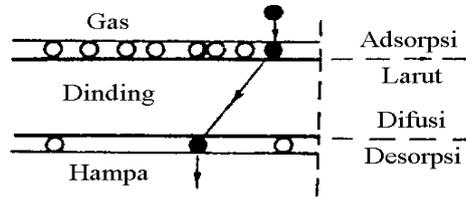
$$Q_V = V \cdot A \quad (6.16)$$

dengan V volume gas akibat penguapan, N_A bilangan avogadro, n kerapatan molekul/atom bahan yang menguap, P tekanan di ruang hampa, k konstanta Boltzman dan T temperatur bejana vakum (ruang vakum), A luas permukaan ruang vakum.

6.1.5. Gas yang masuk dengan cara permeasi melalui dinding (Q_P)

Permeasi merupakan suatu proses masuknya molekul-molekul/atom-atom gas dari permukaan luar yang mempunyai tekanan atmosfer ke permukaan dalam yang harus divakumkan. Proses masuknya molekul-molekul/atom-atom gas ini melalui 4 tahap yaitu adsorpsi, pelarutan, difusi dan desorpsi (Gambar 6.6). Pada tahap pertama (adsorpsi), molekul-molekul/atom-atom gas menempel pada permukaan luar dinding. Setelah molekul-molekul/atom-atom menempel pada permukaan luar dilanjutkan tahap yang kedua (pelarutan) yaitu molekul-molekul/atom-atom gas larut di dalam dinding. Selanjutnya tahap yang ketiga (difusi), difusi adalah molekul-molekul/atom-atom ini menembus dinding dari permukaan luar ke permukaan dalam. Difusi ini disebabkan bahan dinding mempunyai permeabilitas sehingga memungkinkan molekul-molekul/atom-atom yang telah larut di permukaan luar dan mempunyai konsentrasi tinggi menembus ke permukaan dalam. Tahap yang terakhir (desorpsi) yaitu molekul-molekul/atom-atom gas

setelah mencapai di permukaan dinding bagian dalam melepaskan dari permukaan yang disebabkan oleh adanya tekanan yang sangat rendah (kevakuman tinggi).



Gambar 6.6. Proses terjadinya permeasi [2].

Berdasarkan hukum Fick pertama dan kedua serta melalui penjabaran lebih lanjut maka laju permeasi spesifik (q_p) dapat dihitung dengan persamaan [2]

$$q_p = D_1 b \frac{P_1^{1/j} - P_2^{1/j}}{h} \quad (6.17)$$

dengan D_1 koefisien difusi, b konstanta kelarutan, P_1, P_2 tekanan di sisi permukaan luar dan dalam, h tebal dinding dan j konstanta desosiasi. Konstanta-konstanta ini untuk masing-masing gas pada masing-masing jenis logam berbeda. Perkalian antara koefisien difusi dan konstanta kelarutan yaitu $D_1 b$ disebut konstanta permeasi (K). Nilai konstanta difusi dan konstanta permeasi untuk gas hidrogen pada *stainless steel* 309 S ditunjukkan pada Tabel 6.1 dan Tabel 6.2 serta pada Gambar 6.7 dan 6.8. Dengan besaran-besaran ini laju permeasi spesifik dapat dihitung dan laju permeasi yang terjadi (Q_p) ditentukan dengan persamaan [2]

$$Q_p = q_p A \quad (6.18)$$

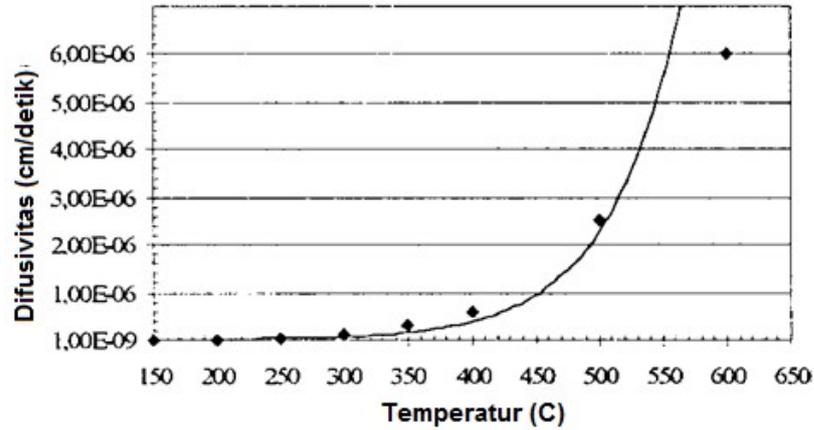
dengan A luas permukaan ruang hampa.

Tabel 6.1. Koefisien difusi (D_1) gas hidrogen dalam SS 309 S [24].

T (°C)	150	200	250	300	350	400	500	600
D_1 (cm ² /det)	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$

Tabel 6.2. Konstanta permeasi ($D_1b = K$) untuk gas hidrogen dalam SS 309 S [24].

T (°C)	200	250	300	350	400	500	600
K	$2 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$



Gambar 6.7. Hubungan koefisien difusi sebagai fungsi temperatur untuk SS 309 S [24].

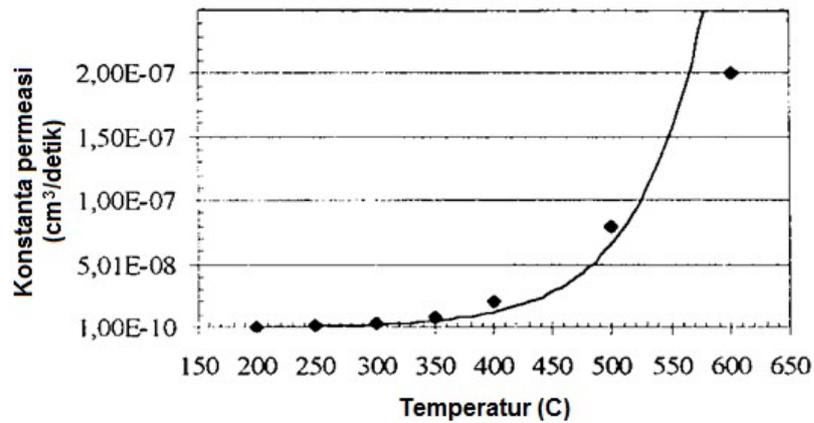
6.1.6. Jumlah gas sebagai beban pompa (Q_G)

Dengan ditentukannya rincian beban gas di dalam sistem vakum pada kondisi *steady state* yang meliputi: (1) gas yang masuk karena adanya kebocoran, (2) gas yang disebabkan adanya pelepasan gas (*outgassing*), (3) gas yang disebabkan adanya penguapan dan (4) gas yang masuk dengan cara permeasi melalui dinding maka besar gas yang harus dipompa atau beban pompa (Q_G) untuk kondisi *steady state* adalah

$$Q_G = Q_L + Q_D + Q_V + Q_P. \quad (6.19)$$

Selanjutnya kevakuman akhir yang dapat dicapai (P_u) dihitung dengan persamaan

$$P_u = \frac{Q_G}{S_{ef}} \quad (6.20)$$



Gambar 6.8. Hubungan konstanta permeasi sebagai fungsi temperatur untuk SS 309 S [24].

6.17. Waktu pemompaan (t)

Waktu pemompaan adalah waktu yang diperlukan untuk menurunkan tekanan dari tekanan awal menjadi tekanan akhir atau untuk meningkatkan kevakuman dari kevakuman awal sampai kevakuman akhir. Di dalam sistem vakum, waktu pemompaan dibagi menjadi 2 (dua) yaitu: (1) waktu pemompaan pada aliran kental (vakum rendah) dan (2) waktu pemompaan, pada aliran molekular (vakum tinggi). Untuk waktu pemompaan pada aliran kental dengan asumsi laju pemompaan tetap selama proses pemompaan walaupun sesungguhnya dipengaruhi akibat penurunan tekanan selama pemompaan, sedangkan waktu pemompaan pada aliran molekular, di samping dipengaruhi oleh perubahan tekanan (kevakuman) juga dipengaruhi oleh perubahan beban (jumlah gas yang dipompa). Hal ini disebabkan oleh perubahan tekanan akan menyebabkan perubahan laju pelepasan gas (*outgassing*), laju permeasi, laju kebocoran, dan laju penguapan.

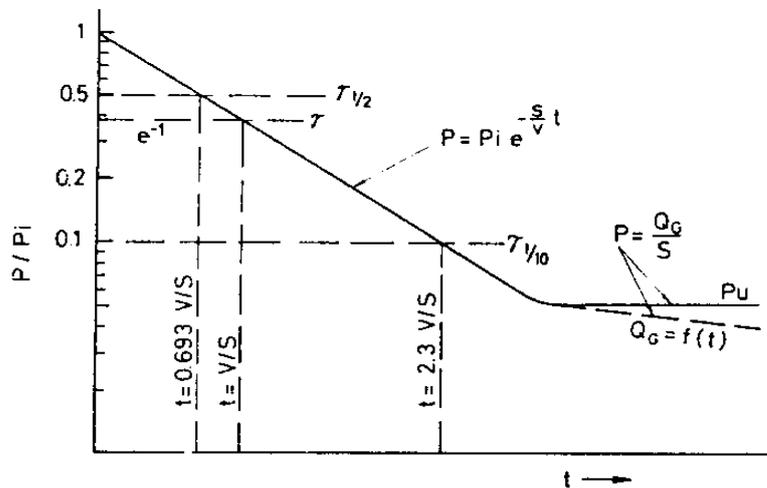
a. Untuk aliran kental

$$t = \frac{V}{S_{ef}} \ln \frac{P_i}{P} \quad (6.21)$$

2. Untuk aliran molekular

$$t = \left(\frac{V}{S_p} \right) \left[1 + \frac{S_p}{C} \right] \ln \frac{P_i - P_u}{P - P_u} \tag{6.22}$$

dengan t waktu yang diperlukan untuk memvakumkan, S_{ef} laju pemompaan efektif, P_i tekanan awal, P tekanan yang dicapai pada waktu (t), S_p laju pemompaan pompa dan P_u tekanan akhir yang dapat dicapai. Untuk mempermudah pemahaman penurunan tekanan atau kenaikan tingkat kehampaan sebagai fungsi waktu pemompaan dapat dilihat pada Gambar 6.9.



Gambar 6.9. Penurunan tekanan sebagai fungsi waktu pemompaan.

6.1.8. Contoh 1, perhitungan instalasi sistem vakum [25]

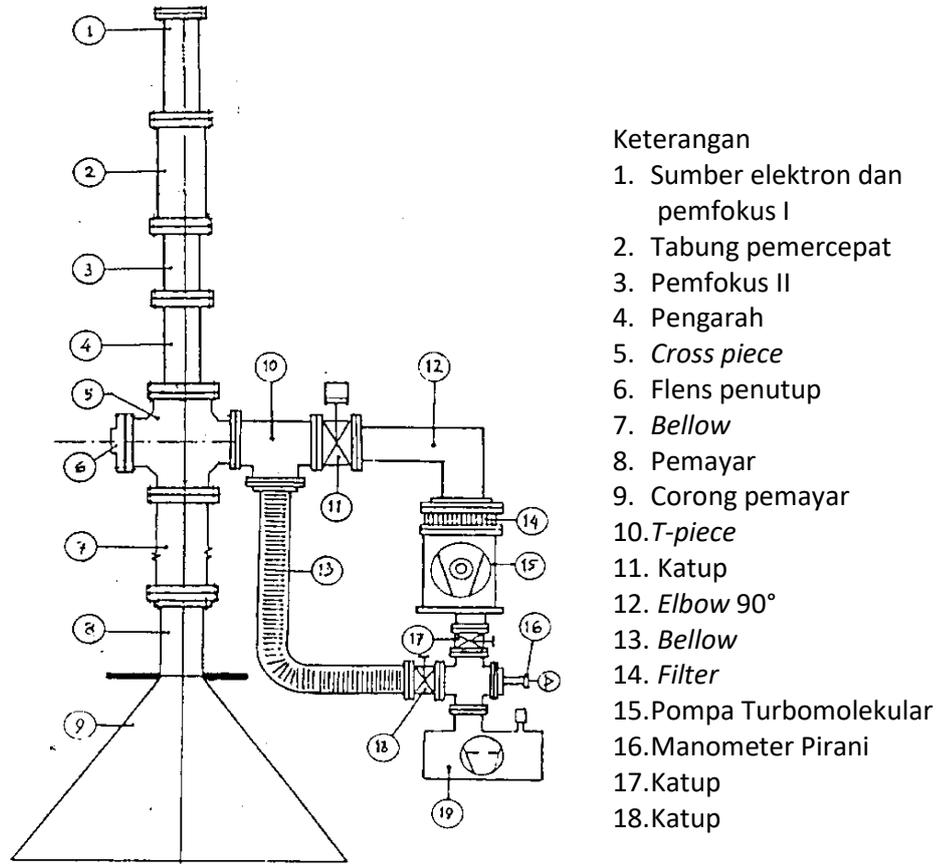
Di dalam sistem vakum mesin berkas elektron pada Gambar 6.10, bagian-bagian yang harus divakumkan meliputi: sumber elektron, sistem pemfokus, tabung akselerator, sistem pengarah, dan pemayar serta corong pemayar. Agar dalam perhitungan dapat berhasil dengan baik, maka sebelum dikonstruksi dilakukan perhitungan khususnya terkait dengan instalasi sistem vakum (Gambar 6.10). Perhitungan dapat dilakukan dengan menghitung tiap-tiap bagian kemudian dijumlahkan atau dengan cara menghitung secara keseluruhan. Namun demikian untuk mempermudah perhitungan dan

meningkatkan ketelitian, maka dilakukan untuk tiap-tiap bagian kemudian dijumlahkan. Perhitungan ini meliputi beban gas yang harus dipompa, daya hantar saluran dan tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai. Data-data yang digunakan untuk perhitungan adalah dimensi-dimensi dari komponen-komponen yang berkaitan dengan sistem vakum, konstanta-konstanta yang berkaitan dengan pelepasan gas (*outgassing*), permeasi, dan kebocoran.

Perhitungan

Perhitungan beban gas yang harus dipompa meliputi: Jumlah gas yang berada di dalam ruangan yang harus dihampakan dan jumlah gas akibat pelepasan gas (*outgassing*), permeasi, kebocoran dan penguapan. Jumlah gas yang berada di dalam ruangan tergantung dari volume ruangan yang harus dihampakan, volume ruangan ini akan mempengaruhi waktu penghampaan awal dengan pompa rotari. Sedangkan jumlah gas akibat pelepasan gas dan permeasi sangat tergantung dengan besarnya konstanta-konstanta yang berkaitan dengan sifat bahan terhadap pelepasan gas dan luas dinding instalasi sistem hampa. Untuk gas akibat kebocoran tergantung dari penggunaan bahan perapat (*seal*) dan gas akibat penguapan tergantung dari jenis bahan yang ada di dalam ruangan yang dihampakan.

Untuk memudahkan perhitungan maka dihitung tiap-tiap bagian meliputi: tabung sumber elektron dan pemfokus I, tabung akselerator, tabung pemfokus II, *T-piece*, *bellow*, corong pemayar dan *elbow*.



Gambar 6.10. Instalasi sistem vakum mesin berkas elektron.

Tabung Sumber Elektron dan Pemfokus I

Laju permeasi

Untuk menentukan besarnya laju permeasi perlu diketahui terlebih dahulu konstanta-konstanta yang diperlukan meliputi: koefisien difusi (D_1), konsentrasi gas ketika $t_h = 0$ (ϵ_0) dan konstanta permeasi ($D_1 b$). Setelah konstanta-konstanta tersebut diketahui, konstanta-konstanta yang lain dihitung dan kemudian dihitung besar laju permeasi yang terjadi. Dalam perhitungan ini besar koefisien difusi (D_1) dan konstanta permeasi ($D_1 b = K$) ditentukan berdasarkan ekstrapolasi Tabel 6.1 dan Tabel 6.2 atau Gambar 6.7 dan Gambar 6.8.

Dari Gambar 6.7 didapatkan persamaan garis untuk menentukan nilai koefisien difusi

$$D_1 = (3 \times 10^{-10}) \times \exp(0,0176 \times T) \quad (6.23)$$

dengan mengekstrapolasi persamaan garis untuk temperatur bahan (T) 30°C didapatkan nilai $D_1 = 4,825 \cdot 10^{-10} \text{ (cm}^2\text{/det)}$.

Sedangkan dari Gambar 6.8 didapatkan persamaan garis untuk menentukan konstanta permeasi

$$K = (1 \times 10^{-11}) \times \exp(0,017 \cdot T) \quad (6.24)$$

dengan mengekstrapolasi persamaan garis untuk temperatur bahan (T) 30°C didapatkan nilai $K = 1,582 \cdot 10^{-11}$, sehingga nilai konstanta kelarutan (b) adalah

$$\begin{aligned} b &= K/D_1 \\ &= 0,033. \end{aligned}$$

Untuk menentukan laju permeasi perlu dihitung terlebih dahulu laju permeasi spesifik (q_p) yaitu menggunakan persamaan (6.16) dan dengan konstanta desosiasi $j = 2$ untuk gas diatomik dalam logam dan tebal dinding (h) = $0,3 \text{ cm}$ [24]

$$\begin{aligned} q_p &= 1,582 \times 10^{-11} \left[\frac{(760)^{\frac{1}{2}} - (3,375 \times 10^{-6})^{\frac{1}{2}}}{0,3} \right] \\ &= 1,454 \times 10^{-9} \text{ Torr liter/detik cm}^2 \end{aligned}$$

Kemudian besar laju permeasi dihitung dengan persamaan (6.17) dan luas permukaan yang menyebabkan terjadinya permeasi adalah sama dengan luas permukaan yang menyebabkan terjadinya pelepasan gas yaitu sebesar $1230,88 \text{ cm}^2$, maka

$$Q_p = 1,454 \cdot 10^{-9} \text{ Torr liter/detik}$$

Pelepasan Gas

Untuk menentukan besar laju pelepasan gas perlu diketahui terlebih dahulu konstanta-konstanta yang diperlukan meliputi: konstanta waktu difusi, konstanta waktu operasi, koefisien difusi, konsentrasi gas hidrogen dan konstanta pelepasan gas.

Konstanta waktu difusi (ξ) dihitung dengan persamaan (6.8), untuk tebal dinding $h_o = 0,3$ cm

$$\xi = \frac{\pi \times (0,3)^2}{(5,76 \times 10^4) \times (4,825 \times 10^{-10})} = 1,017 \times 10^4.$$

Konstanta waktu difusi setelah pompa dioperasikan dihitung dengan persamaan (6.7), karena $\xi > 10^4$

$$t_h = \frac{1,017 \times 10^4}{4} = 2,542 \times 10^3.$$

sedangkan besarnya konsentrasi gas hidrogen ketika $t_h = 0$ (ε_0) untuk bahan *stainless steel* adalah $0,4 \text{ cm}^3 \text{ (STP)/cm}^3$ dan konstanta yang berkaitan dengan bahan $\gamma = \frac{1}{2}$. Untuk menghitung laju pelepasan gas perlu dihitung terlebih dahulu konstanta-konstanta pelepasan gas spesifik yaitu dengan persamaan (6.9) dan persamaan (6.10) kemudian laju pelepasan gas spesifik

$$\begin{aligned} K_1 &= \left(\frac{2,79 \times 10^{-3}}{3600^{1/2}} \right) \times 300 \times 0,4 \left(\frac{4,825 \times 10^{-10}}{\pi} \right)^{1/2} \\ &= 6,917 \times 10^{-8} \text{ Torr liter/detik cm}^2. \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned} K_u &= 2,79 \cdot 10^{-3} \times 300 \left(\frac{(4,825 \times 10^{-10}) \times 0,333}{3} \right) 3,8 \times 10^{-4} \\ &= 1,688 \times 10^{-14} \text{ Torr liter/cm}^2. \end{aligned}$$

Sehingga laju pelepasan gas spesifik ($q_D = K_h$) dihitung dengan persamaan (6.5)

$$\begin{aligned} K_h &= 1,688 \times 10^{-14} + \left[\frac{6,917 \times 10^{-8}}{(2,542 \times 10^3)^{1/2}} \right] \\ &= 1,372 \times 10^{-9} \text{ Torr liter/cm}^2. \end{aligned}$$

Laju pelepasan gas (Q_D) pada sumber elektron dihitung dengan persamaan (6.11) dengan luas permukaan (A) yang menyebabkan terjadinya pelepasan gas sebesar $1230,88 \text{ cm}^2$

$$\begin{aligned} Q_D &= (1,372 \times 10^{-9}) \times 1230,88 \\ &= 1,689 \times 10^{-6} \text{ Torr liter/detik.} \end{aligned}$$

Laju kebocoran

Dalam menentukan besar laju kebocoran yang terjadi pada sambungan-sambungan diperlukan data-data flens, perapat (*seal*), indeks pengencangan baut pengikat flens dan tinggi puncak. Untuk flens DN 160 KF menggunakan perapat *viton* dengan keliling perapat $L = 48,29$ cm, lebar $w = 0,82$ cm, indeks pengencangan $K = 0,6$ dan tinggi puncak $A = 1 \cdot 10^{-4}$ cm, kemudian daya hantar (C) dihitung dengan persamaan (6.2) didapatkan

$$\begin{aligned} C &= 4 \left(\frac{303}{28,98} \right)^{\frac{1}{2}} \times (1 \cdot 10^{-4}) \times \frac{48,29}{0,82} \times \exp \left(\frac{-3 \times 0,6}{48,29 \times 0,82 \times 0,5} \right) \\ &= 3,4452 \times 10^{-8} \text{ liter/detik.} \end{aligned}$$

Kemudian laju kebocoran dihitung dengan persamaan (6.4) didapatkan

$$\begin{aligned} Q_L &= (3,4452 \times 10^{-8}) \times 760 \\ &= 2,61836 \times 10^{-5} \text{ Torr liter/detik.} \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama untuk bagian-bagian yang lain dapat dihitung dan hasilnya ditabelkan pada Tabel 6.3.

Selanjutnya ditentukan daya hantar di dalam *elbow* dihitung dengan persamaan (3.17), persamaan (3.18) dan persamaan (3.19) sebagai berikut

$$\begin{aligned} C_1 &= 3,81 \left(\frac{303}{28,98} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1 \cdot 10^3}{10 + 20 + 1,33 \times 10} \right) \\ &= 284,42 \text{ liter/detik} \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned} C_2 &= 3,81 \left(\frac{303}{28,98} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1 \times 10^3}{10 + 20} \right) \\ &= 410,51 \text{ liter/detik} \end{aligned}$$

sehingga didapatkan

$$\begin{aligned} C &= 284,42 \text{ liter/detik} + 410,51 \text{ liter/detik} \\ &= 694,93 \text{ liter/detik} \end{aligned}$$

Tabel 6.3. Rangkuman hasil perhitungan beban gas yang dipompa.

No.	Bagian-bagian MBE	Q_D (Torr l/det)	Q_P (Torr l/det)	Q_L (Torr l/det)
1	Sumber elektron & pemfokus I	$1,689 \times 10^{-6}$	$1,790 \times 10^{-6}$	$2,6184 \times 10^{-5}$
2	Tabung akselerator	$6,893 \times 10^{-6}$	$7,305 \times 10^{-6}$	$7,8552 \times 10^{-5}$
3	Pemfokus II	$1,215 \times 10^{-6}$	$1,288 \times 10^{-6}$	$2,6184 \times 10^{-5}$
4	<i>T-piece</i>	$0,638 \times 10^{-6}$	$0,676 \times 10^{-6}$	$7,8552 \times 10^{-5}$
5	<i>Bellow</i>	$1,551 \times 10^{-6}$	$1,644 \times 10^{-6}$	$2,6184 \times 10^{-5}$
6	Corong Pemayar	$3,6231 \times 10^{-5}$	$3,8361 \times 10^{-5}$	$1,04746 \times 10^{-4}$
7	<i>Elbow</i>	$1,740 \times 10^{-6}$	$5,599 \times 10^{-6}$	$2,6184 \times 10^{-5}$
	Jumlah	$4,6357 \times 10^{-5}$	$5,6663 \times 10^{-5}$	$3,66576 \times 10^{-4}$
	Jumlah Beban gas	$4,69596 \times 10^{-4}$ Torr lt./detik		
	$Q_G = Q_D + Q_P + Q_L$			

Laju pemompaan efektif ditentukan dengan persamaan (3.22) dan data spesifikasi pompa turbomolekular. Pompa turbomolekular yang digunakan adalah jenis TMU-520 yang mempunyai laju pemompaan untuk nitrogen 500 liter/menit, maka laju pemompaan efektif adalah

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{694,93} + \frac{1}{500}$$

$$S_{ef} = 290,78 \text{ liter/detik}$$

Dengan demikian tingkat kevakuman akhir (P_u) yang dapat dicapai ditentukan dengan persamaan (6.19) sehingga didapatkan

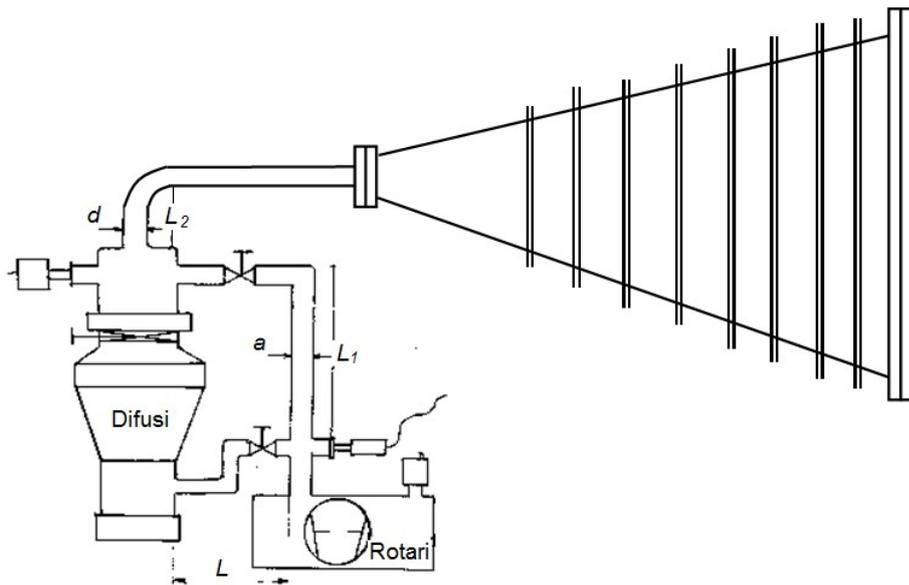
$$P_u = \frac{4,69596 \times 10^{-4}}{290,78}$$

$$= 1,62 \times 10^{-6} \text{ Torr.}$$

Dari hasil analisis instalasi sistem hampa didapatkan beban gas keseluruhan $4,69596 \times 10^{-4}$ Torr liter/detik, daya hantar *elbow* 694,93 liter/detik, laju pemompaan efektif 290,78 lt./detik dan tingkat kehampaan akhir yang dapat dicapai $1,62 \times 10^{-6}$ Torr. Dengan hasil ini cukup baik untuk mendukung operasi mesin berkas elektron karena dengan tingkat kehampaan ini hambatan yang terjadi dalam transpor berkas elektron dari sumber elektron sampai ke *window* cukup kecil. Selanjutnya diharapkan setelah sistem hampa tersebut diinstalasi dihasilkan tingkat kehampaan akhir sesuai dengan analisis, sehingga dapat mendukung operasi mesin berkas elektron 500 keV/10 mA.

6.1.9. Contoh 2, perhitungan dan pengujian kevakuman corong pemayar [26]

Pengujian komponen-komponen instalasi akselerator sangat penting dan harus dilakukan sebelum komponen tersebut diinstal menjadi kesatuan unit akselerator agar tidak terjadi kegagalan instalasi karena kegagalan komponen. Satu di antara komponen penting akselerator khususnya akselerator elektron (mesin berkas elektron) adalah corong pemayar. Pengujian yang sangat penting untuk corong pemayar adalah pengelasan, dudukan (tempat pemasangan perapat/*seal*). Hal tersebut terkait dengan kemampuan untuk divakumkan hingga mencapai vakum tinggi/sangat tinggi sesuai dengan kondisi operasi mesin berkas elektron. Untuk keperluan ini dilakukan pengujian corong pemayar sebelum diinstal. Pengujian ini dibagi 2 (dua) yaitu (1) perhitungan secara analitis untuk mengetahui secara teori kondisi corong pemayar dan 2 pengujian dengan eksperimental *set-up* yaitu corong pemayar dirakit dengan sistem vakum dan divakumkan hingga mencapai tingkat kevakuman akhir. Perakitan corong pemayar untuk pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 6.11.



Gambar 6.11. Perakitan corong pemayar dengan sistem vakum.

Perhitungan

Jumlah gas di dalam corong pemayar merupakan beban pemompaan awal dan dipompa dengan pompa rotari serta dilanjutkan dengan pompa difusi. Dalam pengujian ini digunakan unit pompa vakum RD 150 yang merupakan rangkaian pompa rotari dan difusi. Laju pemompaan pompa rotari $4 \text{ m}^3/\text{jam}$ (1,111 liter/detik) dan laju pemompaan pompa difusi 150 liter/detik. Beban pompa adalah volume gas di dalam corong pemayar dan karena permeasi, pelepasan gas (*outgassing*) dan kebocoran. Perhitungan seperti pada contoh 1.

Laju permeasi

Untuk menentukan besarnya laju permeasi perlu diketahui terlebih dahulu konstanta-konstanta yang diperlukan meliputi: koefisien difusi (D_1), konsentrasi gas ketika $t_h = 0$ (ε_0) dan konstanta permeasi ($D_1 b$). Setelah konstanta-konstanta tersebut diketahui, konstanta-konstanta yang lain dihitung dan kemudian dihitung besar laju permeasi yang terjadi. Dalam perhitungan ini besar koefisien difusi (D_1) dan konstanta permeasi ($D_1 b = K$)

ditentukan berdasarkan ekstrapolasi Tabel 6.1 dan Tabel 6.2 atau Gambar 6.7 dan Gambar 6.8.

Dari Gambar 6.7 didapatkan persamaan garis untuk menentukan nilai koefisien difusi

$$D_1 = 3.10^{-10} \times \exp(0,0176 \times T) \quad (6.25)$$

Dan dengan mengekstrapolasi persamaan garis untuk temperatur bahan (T) 30 °C didapatkan nilai $D_1 = 4,825 \times 10^{-10}$ (cm²/det), sedangkan dari Gambar 6.8 didapatkan persamaan garis untuk menentukan konstanta permeasi

$$K = 1.10^{-11} \times \exp(0,017 \times T) \quad (6.26)$$

dan dengan mengekstrapolasi persamaan garis untuk temperatur bahan (T) 30 °C didapatkan nilai $K = 1,582 \cdot 10^{-11}$, sehingga nilai konstanta kelarutan (b) adalah

$$\begin{aligned} b &= K/D_1 \\ &= 0,033. \end{aligned}$$

Untuk menentukan laju permeasi perlu dihitung terlebih dahulu laju permeasi spesifik (q_p) yaitu menggunakan persamaan (6.16) dan dengan konstanta desosiasi $j = 2$ untuk gas diatomik dalam logam [24]

$$\begin{aligned} q_p &= 1,582 \times 10^{-11} \left[\frac{(760)^{1/2} - (1 \times 10^{-5})^{1/2}}{0,8} \right] \\ &= 5,54096 \times 10^{-11} \text{ Torr liter/detik.} \end{aligned}$$

Kemudian besarnya laju permeasi dihitung dengan persamaan (6.17) dan luas permukaan yang menyebabkan terjadinya permeasi adalah sama dengan luas permukaan yang menyebabkan terjadinya pelepasan gas yaitu sebesar 11.595,8 cm²

$$Q_p = 6,32083 \times 10^{-7} \text{ Torr liter/detik.}$$

Pelepasan gas (*outgassing*)

Jumlah gas yang disebabkan oleh pelepasan gas ini tergantung dari temperatur, bentuk, jenis bahan yang digunakan dan pengolahan permukaan (kekasaran, pembersihan dan sebagainya). Untuk menentukan besarnya laju pelepasan gas perlu diketahui terlebih dahulu konstanta-konstanta yang diperlukan meliputi: konstanta waktu difusi, konstanta waktu operasi, koefisien difusi, konsentrasi gas hidrogen dan konstanta pelepasan gas.

Konstanta waktu difusi (ξ) dihitung dengan persamaan (6.8), untuk tebal dinding (h_0) 0,8 cm

$$\xi = \frac{\pi \times (0,8)^2}{(5,76 \times 10^4) \times (4,825 \times 10^{-10})} = 7,2345 \cdot 10^4.$$

Konstanta waktu difusi setelah pompa dioperasikan dihitung dengan persamaan (6.7), karena $\xi > 10^4$

$$t_h = \frac{7,2345 \times 10^4}{4} = 1,8086 \times 10^4.$$

Nilai konsentrasi gas hidrogen ketika $t_h = 0$ (ε_0) untuk bahan *stainless steel* adalah $0,4 \text{ cm}^3 \text{ (STP)/cm}^3$ dan konstanta yang berkaitan dengan bahan $\gamma = \frac{1}{2}$. Untuk menghitung laju pelepasan gas perlu dihitung terlebih dahulu konstanta-konstanta pelepasan gas spesifik yaitu dengan persamaan (6.9) dan persamaan (6.10) kemudian laju pelepasan gas spesifik

$$K_1 = \left(\frac{2,79 \times 10^{-3}}{3600^{1/2}} \right) \times 300 \times 0,4 \left(\frac{4,825 \times 10^{-10}}{\pi} \right)^{1/2}$$
$$= 6,917 \times 10^{-8} \text{ Torr liter/detik cm}^2$$

dan

$$K_u = (2,79 \times 10^{-3}) \times 300 \left(\frac{(4,825 \times 10^{-10}) \times 0,333}{0,8} \right) 3,8 \times 10^{-4}$$
$$= 6,3879 \times 10^{-14} \text{ Torr liter/detik cm}^2,$$

sehingga laju pelepasan gas spesifik ($q_D = K_h$) dihitung dengan persamaan (6.5)

$$K_h = 1,688 \times 10^{-14} + \left[\frac{6,917 \times 10^{-8}}{(1,8086 \times 10^4)^{1/2}} \right]$$

$$= 5,14399 \times 10^{-14} \text{ Torr liter/detik cm}^2.$$

Laju pelepasan gas (Q_D) pada sumber elektron dihitung dengan persamaan (6.11) dengan luas permukaan (A) yang menyebabkan terjadinya pelepasan gas sebesar $11.595,8 \text{ cm}^2$.

$$Q_D = (5,14399 \times 10^{-9}) \cdot 11.595,8$$

$$= 5,96487 \times 10^{-6} \text{ Torr liter/detik.}$$

Laju kebocoran

Dalam menentukan besarnya laju kebocoran yang terjadi pada sambungan-sambungan diperlukan data-data flens, perapat (*seal*), indeks pengencangan baut pengikat flens dan tinggi puncak. Untuk flens DN 160 KF digunakan perapat *viton* dengan keliling perapat (L) 48,29 cm, lebar (w) 0,82 cm. Untuk pengujian kehampaan ini perapat flens penjepit jendela digunakan *viton* dengan keliling (L) 260 cm dan lebar (w) 0,82 cm. Sehingga keliling *viton* untuk 2 sambungan (flens DN 160 KF dan penjepit jendela) adalah 308,29 cm. Indeks pengencangan $K = 0,6$ dan tinggi puncak $A = 6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$, kemudian daya hantar (C) dihitung dengan persamaan (6.2) didapatkan

$$C = 4 \left(\frac{303}{28,98} \right)^{1/2} \times (6 \times 10^{-6}) \times \frac{308,29}{0,82} \times \exp \left(\frac{-3 \times 0,6}{308,29 \times 0,82 \times 0,5} \right)$$

$$= 1,7258 \times 10^{-7} \text{ liter/detik.}$$

Kemudian laju kebocoran dihitung dengan persamaan (6.4) didapatkan

$$Q_L = (1,7258 \times 10^{-7}) \times 760$$

$$= 1,3116234 \times 10^{-4} \text{ Torr liter/detik.}$$

Dengan demikian, beban pompa pada kondisi *steady state* (Q_G) adalah

$$Q_G = Q_p + Q_D + Q_L$$

$$= (6,32083 \times 10^{-7} + 5,96487 \times 10^{-6} + 1,3116234 \times 10^{-4}) \text{ Torr liter/detik}$$

$$= 1,3776 \times 10^{-4} \text{ Torr liter/detik.}$$

Tingkat Kehampaan

Untuk menentukan tingkat kehampaannya harus dihitung daya hantar saluran untuk menyambung pompa difusi dengan corong pemayar. Saat pengujian digunakan saluran dari *elbow* yang mempunyai diameter (D) 4 cm dan panjang (L) 50 cm, sehingga daya hantar dihitung dengan persamaan (3.15) sebagai berikut

$$C = 3,81 \left(\frac{303}{28,98} \right)^{1/2} \left(\frac{4^3}{50} \right)$$
$$= 15,769 \text{ liter/detik.}$$

Laju pemompaan pompa difusi 150 liter/detik, maka berdasarkan persamaan (3.22) laju pemompaan efektif adalah

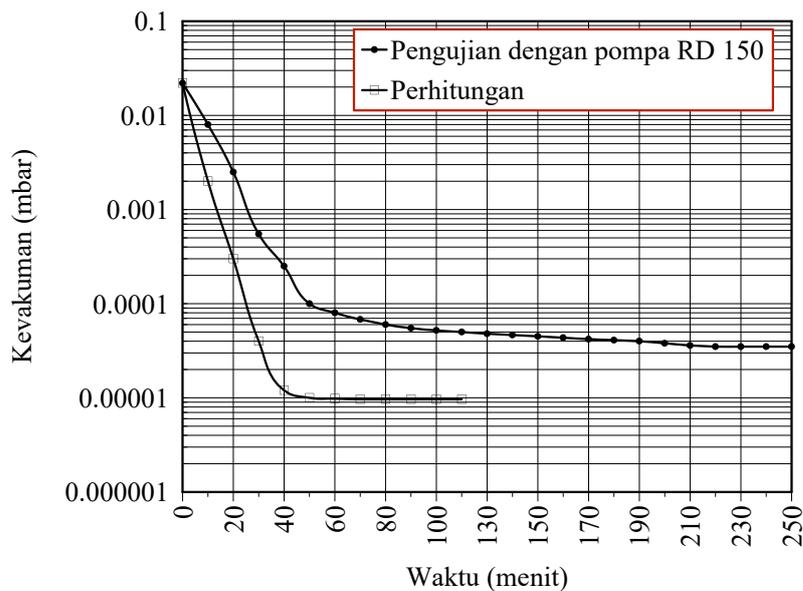
$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{15,769} + \frac{1}{150}$$
$$S_{ef} = 14,269 \text{ lt./detik}$$

Dengan demikian tingkat kehampaan akhir (P_u) yang dapat dicapai pada pengujian ini ditentukan dengan persamaan (6.19) sehingga didapatkan

$$P_u = \frac{1,377587 \times 10^{-4}}{14,269}$$
$$= 9,65 \times 10^{-6} \text{ Torr.}$$

Dari hasil perhitungan kevakuman corong pemayar didapatkan bahwa beban gas keseluruhan $1,3776 \times 10^{-4}$ Torr liter/detik, daya hantar saluran pada pengujian 15,769 liter/detik, laju pemompaan efektif 14,269 liter/detik dan tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai $9,65 \times 10^{-6}$ Torr. Hasil perhitungan dan pengujian kevakuman sebagai fungsi waktu saat pemompaan dengan pompa difusi RD 150 ditunjukkan pada Gambar 6.12. Hasil perhitungan ini dihitung menggunakan persamaan (6.21) dan volume ruang yang dihampakan (V) yaitu volume corong pemayar sebesar 95,27 liter. Dari hasil perhitungan dan pengujian didapatkan perbedaan yang cukup besar. Hal ini disebabkan karena dalam perhitungan didasarkan dalam kondisi bersih untuk standar komponen sistem hampa, sedangkan dalam pengujian kondisi standar sulit

didapatkan karena kesulitan dalam membersihkan dan perlakuan komponen sistem vakum antara lain pemanasan dalam ruang vakum (*bake*) untuk membersihkan permukaan komponen vakum yang digunakan. Dalam perhitungan, setelah divakumkan selama 45 menit didapatkan kehampaan $9,65 \times 10^{-6}$ Torr. Setelah mencapai kevakuman ini hampir tidak mengalami kenaikan kevakuman karena sudah mencapai kondisi keseimbangan atau kondisi *steady state*. Dalam pengujian, untuk awal pemompaan sampai 60 menit beban gas hampir seluruhnya volume gas di dalam corong pemayar, sedangkan setelah pemompaan selama 60 menit beban gas disebabkan oleh adanya pelepasan gas (*outgassing*), permeasi dan kebocoran. Dalam pengujian, setelah divakumkan selama 60 menit didapatkan kevakuman 9×10^{-5} Torr dan selanjutnya kenaikan kevakuman sangat lambat hingga mencapai $3,5 \times 10^{-5}$ Torr. Hal ini disebabkan laju pelepasan gas (*outgassing*) sesungguhnya jauh lebih besar dari perhitungan. Besar laju pelepasan gas (*outgassing*) ini karena pada komponen sistem vakum tidak dilakukan pemanasan dalam ruang hampa (*bake*) untuk membersihkan permukaan yang divakumkan.



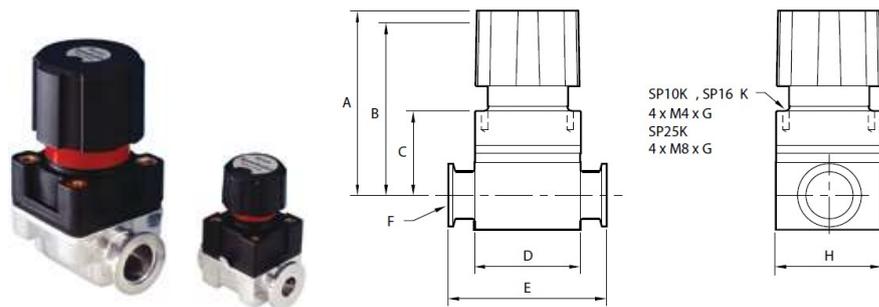
Gambar 6.12. Hubungan kehampaan sebagai fungsi waktu pemompaan dengan pompa difusi RD 150.

Besar laju pelepasan gas ini akan berkurang terhadap waktu pemompaan sehingga kevakuman semakin bertambah dan mencapai keseimbangan yaitu pada kondisi *steady state* pada $3,5 \times 10^{-5}$ Torr. Kevakuman akhir $3,5 \times 10^{-5}$ Torr yang didapatkan dalam pengujian mendekati kemampuan pompa vakum yang digunakan yaitu 2×10^{-5} Torr. Hasil pengujian ini dapat mengindikasikan hasil yang cukup baik dan tidak terjadi kebocoran pada lasan. Dalam instalasi yang sesungguhnya, perapat flens jendela menggunakan kawat aluminium kemurnian tinggi (99,6 %) untuk mengurangi laju kebocoran pada perapat. Di samping itu, pompa yang digunakan adalah pompa turbomolekuler yang mempunyai kapasitas pemompaan 500 liter/detik dan kehampaan akhir $< 1 \times 10^{-10}$ Torr. Dengan kondisi instalasi ini diharapkan dapat dicapai kehampaan akhir $< 5 \times 10^{-6}$ Torr dalam operasi mesin berkas elektron.

VII. KOMPONEN DAN SAMBUNGAN SISTEM VAKUM

7.1. Komponen Sistem Vakum

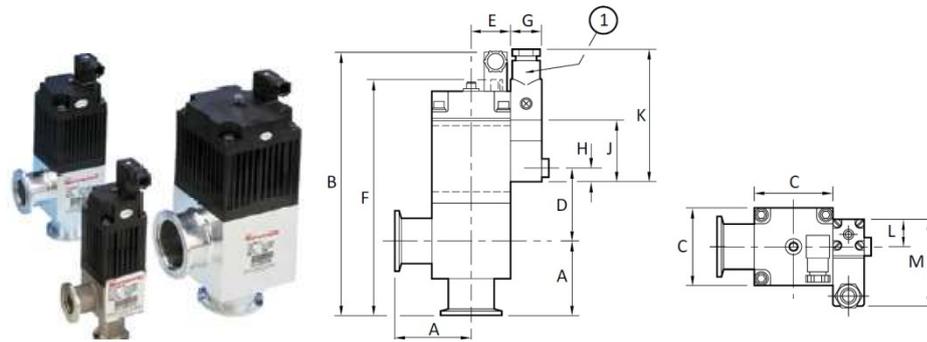
Pada instalasi sistem vakum baik untuk vakum sedang, vakum tinggi maupun vakum sangat tinggi diperlukan beberapa komponen. Komponen-komponen ini meliputi: katup (*valve*), perapat (*O-ring* dan *centering ring* maupun perapat logam), sistem sambungan (*reducing nipple*, *nipple*, *elbow*, *tee*, *cross*, *flexible coupling*, *clamp* dan *venting valve*). Beberapa contoh komponen-komponen ini ditunjukkan pada Gambar 7.1 sampai dengan Gambar 7.10 serta mempunyai ukuran yang standar sesuai dengan ukuran nominal dan standarisasinya. Gambar 7.1 sampai dengan Gambar 7.4 menunjukkan standar dan ukuran-ukuran katup yang berguna untuk pertimbangan dalam pemilihan dari model katup yang akan digunakan, sedangkan spesifikasi lebih detail misalnya daya hantar dan laju kebocoran ditunjukkan pada katalog dari katup tersebut [19], [27].



Keterangan (satuan dalam mm)

Model	A	B	C	D	E	F	G	H
	Terbuka	Tertutup						
SP10K	71	64	33,5	42	60	NW10	8	43
SP16K	71	64	33,5	42	80	NW16	8	43
SP25K	123	111	51	67	100	NW25	12	72
SP40K	130	---	---	105	130	NW40	---	96

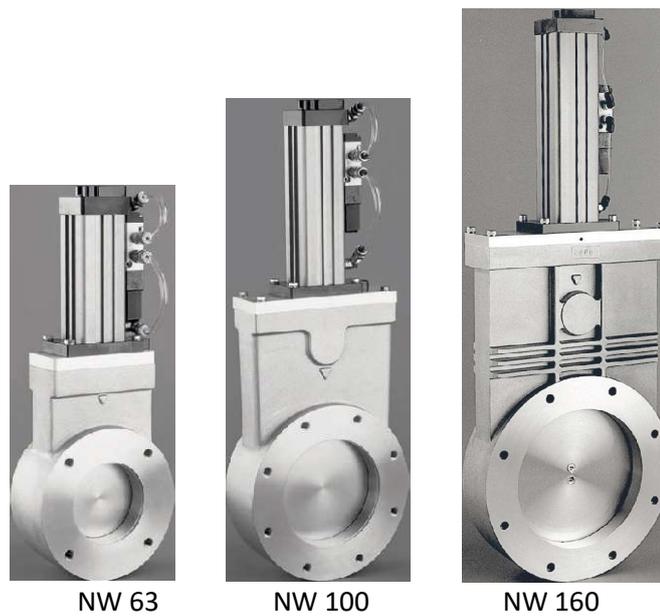
Gambar 7.1. Katup dengan standar KF (perapat *O-ring*) [27].



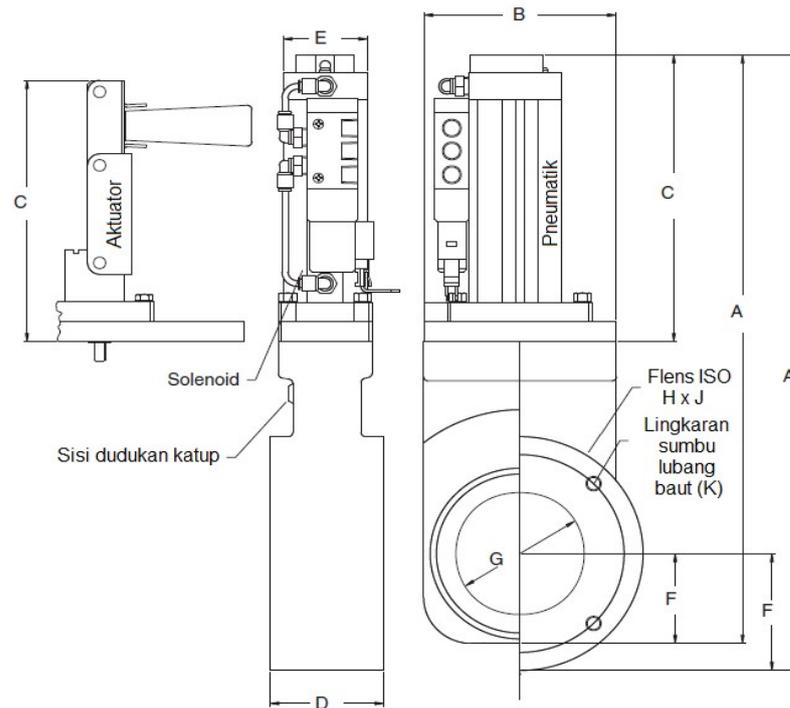
Keterangan (satuan dalam mm)

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M
PV10K	30	139,5	38	41	25	122	20	10	40	88	19	59
PV16K	40	149,5	38	41	25	132	20	10	40	88	19	59
PV25K	50	171,3	50,8	47,6	28	153,7	20	10	40	88	19	59
PV40K	65	200,6	76,2	57,8	41	183	20	10	40	88	19	59
PV50K	70	218	92	70	41	200	20	10	40	88	19	59

Gambar 7.2. Katup pneumatik dengan standar KF (perapat O-ring) [27].



Gambar 7.3. Katup gerbang (*gate valve*) pneumatik [19].

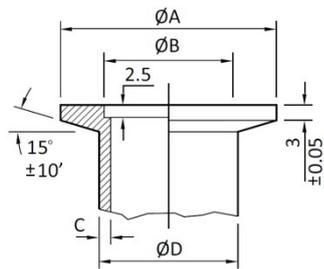


Keterangan (standar ISO, satuan dalam inchi kecuali baut dalam mm)

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
NW63	13,48	4,00	6,28	2,36	1,75	2,56	2,67	M 8×1	4	4,33
NW100	18,00	6,00	7,82	2,36	1,75	3,25	3,94	M 8×1	8	5,71
NW160	24,29	8,46	9,73	2,36	2,05	4,43	6,02	M 10×1,5	8	7,87
NW250	39,92	13,50	16,23	3,15	3,02	6,46	10,25	M 10×1,5	12	12,20

Gambar 7.4. Detil katup gerbang (*gate valve*) [19].

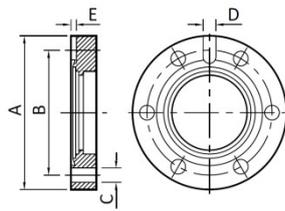
Gambar 7.5 dan Gambar 7.6 adalah contoh standar flens untuk sambungan standar KF yaitu untuk sambungan dengan perapat *O-ring* dan standar CF yaitu untuk perapat logam (tembaga). Gambar 7.7 dan Gambar 7.8 adalah contoh standar *O-ring* dan *centering ring* serta *trapped O-ring*, sedangkan Gambar 7.9 adalah contoh standar klem yang digunakan untuk mengikat sambungan dengan perapat *O-ring*. Untuk standar alur *O-ring* yang langsung dibuat pada flens ditunjukkan pada Gambar 7.10. Gambar 7.11 adalah contoh standar perapat dari logam yang terbuat dari tembaga dan pada Gambar 7.12 adalah contoh standar persilangan (*reducing cross*) yang digunakan untuk menghubungkan dalam persilangan antara flens yang lebih besar ke yang lebih kecil atau sebaliknya dengan perapat *O-ring*.



	A	B	C	D
NW 10	30	12,2	2	14
NW 16	30	17,2	2	20
NW 20	40	22,2	2	25
NW 25	40	26,2	2	28
NW 32	55	34,2	2	38
NW 40	55	41,2	2	44,5
NW 50	75	52,2	2	57

satuan dalam mm

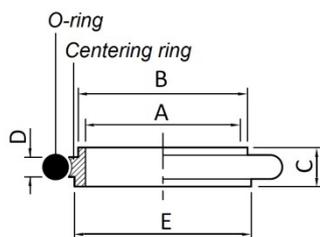
Gambar 7.5. Standar NW (KF) untuk sambungan dengan perapat *O-ring* [27].



Nomial	A	B	C	D	E	Lubang baut
DN16CF	34	27	4,4	-	-	6
DN40CF	70	58,7	6,6	-	-	6
DN63CF	114	92,1	8,4	6	3	8
DN100CF	152	130,2	8,4	6	3	16
DN160CF	202	181	8,4	6	3	20
DN200CF	253	231,8	8,4	6	3	24
DN260CF	306	284	8,4	6	3	32

satuan dalam mm

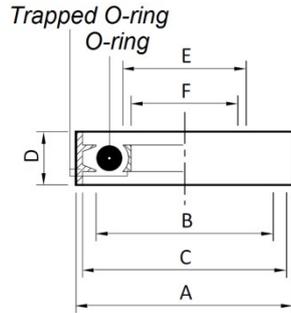
Gambar 7.6. Standar DN (CF) untuk sambungan dengan perapat viton [27].



	A	B	C	D	E
NW10/16 (SS)	10	12	8	3,9	17
NW10/16 (polymer)	10	12	8	3,9	17

satuan dalam mm

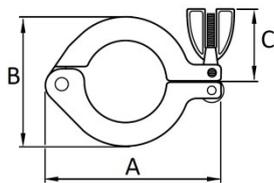
Gambar 7.7. Standar *O-ring* dan centering ring [27].



	A	B	C	D	E	F
NW10/16	32,5	27,5	30,2	7	18,5	16
NW25	42,5	37,5	40,2	7	28,5	25
NW40	57,5	52,0	55,2	7	43,0	40
NW50	77,5	64,5	75,2	7	55,5	50

satuan dalam mm

Gambar 7.8. Standar perapat O-ring dan trapped O-ring [27].



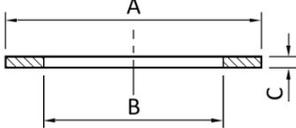
	A	B	C
NW 10/16	62	40	35
NW 20/25	75	50	35
NW 32/40	90	66	35
NW 50	120	86	35

satuan dalam mm

Gambar 7.9. Standar klem [27]

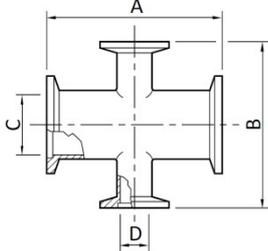
<i>d</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>M</i>
1,78	1,24	2,54	1,65	2,18	1,17	1,50
2,62	1,88	3,67	2,46	3,12	1,60	2,24
3,53	2,54	4,78	3,35	4,22	2,13	3,07
5,34	3,78	7,23	5,08	6,30	3,15	4,70
6,99	5,16	9,75	6,71	8,20	4,09	6,18
7,92	5,84	10,60	7,57	9,40	4,72	7,02
12,70	9,42	15,50	12,22	14,91	7,37	11,30

Gambar 7.10. Standar alur O-ring [12].



	A	B	C
DN16CF	21	16	2
DN40CF	48	37	2
DN63CF	82	63	2
DN100CF	120	101	2
DN160CF	171	152	2
DN200CF	222	203	2
DN250CF	270	254	2

Gambar 7.11. Standar perapat logam (tembaga) [27].



	A	B	C	D
NW25/10	70	70	26,2	12,2
NW25/16	100	80	26,2	17,2
NW40/16	130	80	41,2	17,2
NW40/25	130	100	41,2	26,2
NW50/25	140	100	52,2	26,2

satuan dalam mm

Gambar 7.12. Standar persilangan (*reducing cross*) [27].

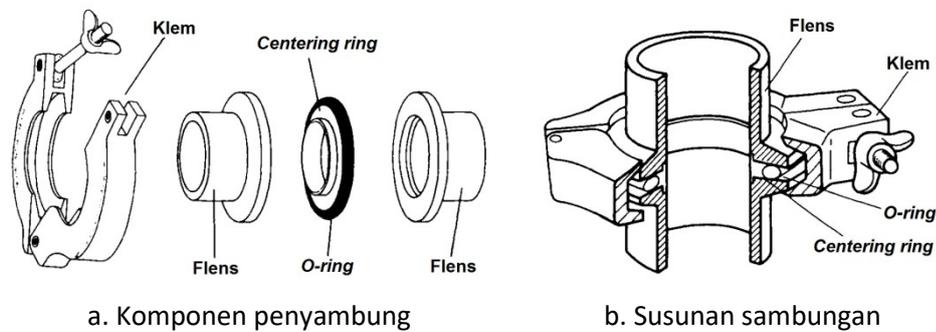
7.2. Sambungan Sistem Vakum

Instalasi sistem vakum terdiri dari beberapa bagian atau komponen, untuk menghubungkan bagian atau komponen yang satu dengan yang lain diperlukan teknik penyambungan. Sambungan di dalam teknik vakum dibagi menjadi 2 (dua) yaitu (1) sambungan dapat dilepas dan (2) sambungan tetap.

7.2.1. Sambungan dapat dilepas

Sambungan dapat dilepas di dalam teknik vakum yaitu sambungan yang menggunakan perapat (*seal*) sehingga sambungan tersebut dapat dilepas setiap saat dan dapat dengan mudah disambung kembali tanpa merusak dan memperbaiki dari bagian atau komponen yang disambung. Perapat yang

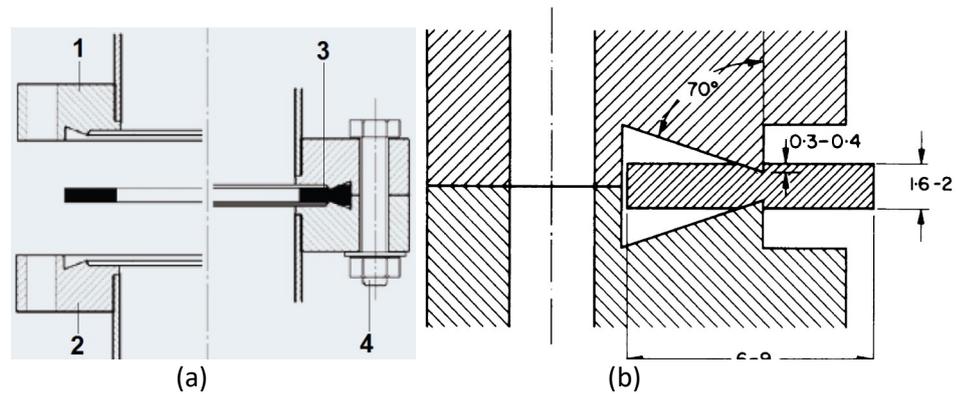
digunakan ada 2 (dua) jenis yaitu perapat yang dapat digunakan berulang-ulang dan perapat yang hanya dapat digunakan 1 (satu) kali pemakaian dan setelah dilepas tidak dapat digunakan kembali. Bentuk perapat yang dapat digunakan berulang-ulang paling banyak dalam bentuk *O-ring* dan bahan yang digunakan untuk pembuatan antara lain: *fluoroelastomer (viton)*, *buna-N (nitrile)*, *neoprene* dan silikon. Contoh sambungan ini ditunjukkan pada Gambar 7.13, sambungan tersebut menggunakan *O-ring*, *centering ring* dan klem yang ukuran standarnya ditunjukkan pada Gambar 7.5, Gambar 7.7 dan Gambar 7.10. Untuk sambungan dengan perapat dengan penggunaan 1 (satu) kali pemakaian yaitu menggunakan perapat jenis logam, bahan logam yang digunakan antara lain: tembaga, aluminium, indium, maupun emas. Contoh sambungan ini ditunjukkan pada Gambar 7.14, sambungan tersebut menggunakan perapat logam yang ukuran standarnya ditunjukkan pada Gambar 7.6 dan Gambar 7.9.



Gambar 7.13. Standar sambungan menggunakan *O-ring* [3].

7.2.1. Sambungan tetap

Sambungan tetap di dalam teknik vakum yaitu sambungan yang cara menyambungannya dengan pengelasan atau *brazing* sehingga tidak menggunakan perapat seperti pada sambungan dapat dilepas. Sambungan ini biasanya digunakan untuk sebagian komponen-komponen sistem vakum misalnya *feedthrough*, persilangan (*cross*) maupun pada instalasi sistem vakum misalnya bejana yang divakumkan. Pengelasan yang diterapkan dalam teknik vakum tidak hanya menekankan pada kekuatan dari lasan.



Keterangan

1. Flens

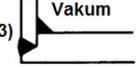
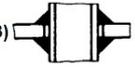
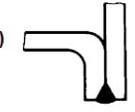
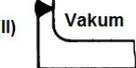
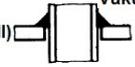
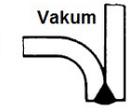
3. Perapat tembaga

2. Flens

4. Baut pengikat

Gambar 7.14. Standar sambungan menggunakan *Conflat* (CF),
 (a) standar *Conflat* (CF) [11], dan (b) detil sambungan *Conflat* (CF) [2].

Hal yang lebih penting adalah untuk meminimalkan beban gas yang harus dipompa akibat dari sambungan las tersebut. Untuk memperoleh hasil tersebut, pengelasan yang direkomendasikan dalam teknik vakum ditunjukkan pada Gambar 7.15. Sebagai contoh sambungan tersusun (kolom B) dan sambungan sudut (kolom E), pengelasan dilakukan pada bagian dalam yaitu yang langsung bersinggungan dengan ruang vakum dan bagian luar hanya dilakukan pengelasan pada titik tertentu. Tujuan pengelasan ini untuk menghindari terjadinya jebakan-jebakan gas atau kotoran (misalnya minyak) diantara 2 (dua) logam yang disambung dan sulit dibersihkan. Dengan jebakan gas atau kotoran maka sangat sulit untuk divakumkan karena gas akan keluar dari jebakan sedikit demi sedikit dan membutuhkan waktu yang sangat lama. Jika dihubungkan dengan beban gas yang harus divakumkan (Gambar 6.3) maka dapat dikategorikan sebagai kebocoran dalam (*internal leakage*). Jika kedua sisi dilakukan pengelasan (kolom B, bagian tengah), jika terjadi kebocoran akan kesulitan dalam mendeteksi lokasi kebocoran yang terjadi sehingga akan kesulitan dalam memperbaikinya.

Jenis	A. Ujung	B. Tersusun	C. T	D. Pojok	E. Sudut
Salah	(1)  Vakum (2) 	(1)  (2)  (3)  Vakum	(1)  Vakum (2)  (3) 	(1) 	(1) 
Betul	(I)  Vakum	(I)  Vakum (II)  Vakum	(I)  Vakum (II)  Vakum (III)  Vakum	Vakum (I) 	(I)  Vakum

Gambar 7.15. Pengelasan yang direkomendasikan dalam teknik vakum [2].

VIII. PENUTUP

Buku ini memberikan gambaran teknologi vakum yang banyak digunakan dalam penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi maupun teknologi yang didukung dan telah dimanfaatkan baik di industri maupun untuk kesehatan. Pemanfaatan teknologi di industri yang didukung teknologi vakum antara lain: mesin berkas elektron yang dimanfaatkan di industri ban, akselerator linear (*Linear accelerator/linac*) dan *rhodotron* yang digunakan untuk terapi kanker dan sterilisasi peralatan kedokteran, siklotron yang dimanfaatkan untuk produksi radioisotop untuk diagnostik kanker, pesawat sinar X (*X-ray*) untuk *scanning* di bandara dan pelabuhan serta untuk *rontgen* (untuk diagnostik). Teknologi vakum juga digunakan untuk industri keperluan rumah tangga misalnya termos untuk menyimpan air panas, lampu pijar maupun lampu neon. Berdasarkan gambaran tentang pentingnya masalah teknologi vakum maka diuraikan hal-hal yang berhubungan dengan teknologi vakum antara lain: kinetika gas khususnya yang berkaitan dengan gerakan molekul/atom, aliran gas pada kondisi vakum, penentuan beban gas yang harus divakumkan, jenis-jenis pompa vakum dan alat ukur kevakuman serta daerah pengoperasiannya. Dari uraian tersebut maka dapat melakukan perhitungan untuk instalasi sistem vakum yang dibutuhkan, pemilihan kebutuhan pompa vakum, komponen-komponen dan standar sambungan yang diperlukan untuk instalasi serta alat ukur kevakuman untuk mengetahui tingkat kevakuman yang dapat dicapai pada instalasi tersebut. Dengan demikian diharapkan buku ini dapat mendasari hal-hal yang berkaitan dengan instalasi sistem vakum khususnya dalam perancangan, perawatan, dan pengoperasian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Jousten, "The History of Vacuum Science and Vacuum Technology," in *in Handbook of Vacuum Technology*, Second Edi., Berlin: Wiley VCH, 2016.
- [2] R. Alexander, *Vacuum Technology*, Fourth imp. Amsterdam: ELSEVIER SCIENCE, 1998.
- [3] D. M. Hoffman, B. Singh, and J. H. Tomson, *Handbook of Vacuum Science and Technology*, First Ed., London: Academic Press, 1998.
- [4] J. F. O'Hanlon, *A User's Guide to Vacuum Technology*, Second Edi. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [5] "https://en.wikipedia.org/wiki/Tungsten_trioxide", diakses 6-11-2016.
- [6] "<https://en.wikipedia.org/wiki/Tungsten>", diakses 6-11-2016.
- [7] "<https://2012books.lardbucket.org/books/introduction-to-chemistry-general-organic-and-biological/s11-03-gases-and-pressure.html>", diakses 16-11-2016..
- [8] "<http://www.atomsinmotion.com/book/chapter1/atoms>", (diakses, 6-6-2017).
- [9] "https://water.me.vccs.edu/courses/ENV295Labs/lesson11_3.htm", diakses 6-6-2017.
- [10] "<http://www.kshitij-ijtee.com/mean-free-path>", diakses 6-6-2017.
- [11] "www.scan.si/gradiva.php?g=45", *Vacuum Technology PFEIFFER*, Volume II, diakses 6-6-2017.
- [12] P. K. Rol, *Pengantar Teknik Vakum, diterjemahkan oleh Peter Soedoyo*, Gajah Mada University Press, Yogyakarta, 1977.
- [13] W. Umrah, *Fundamentals of Vacuum Technology*. Oerlikon Leybold Vacuum, 2007.
- [14] P. Danielson, "How to Choose a Diaphragm Pump," *A J. Pract. Useful. Vac. Technol.*, 2000.
- [15] L. Bertolin, "Vacuum Pump." The US Particle Accelerator School, 2002.
- [16] W. Umrah, *Fundamentals of Vacuum Technology*. Cologne, 1998.
- [17] "https://en.wikipedia.org/wiki/Lobe_pump", diakses, 10-6-2017.
- [18] "Operating Instruction Manual: Oil Diffusion Pumps DIF 160." BALZERS, Asslar, 1979.
- [19] "Agilent Vacuum Products Catalog." 2011.
- [20] "Edward Vacuum Products Catalog", 1984.
- [21] "<https://www.indiamart.com/proddetail/mcleod-gauge-11023031655.html>", diakses, 11-6-2017.
- [22] "<http://nau.edu/cefns/labs/electron-microprobe/glg-510-class-notes/instrumentation>", diakses, 6-6-2017.
- [23] N. Yoshimura, *Vacuum Technology, Practice for Scientific Instruments*,

- Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [24] W. G. Perkins, "Permeation and Outgassing of Vacuum Materials," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 10, 1973.
- [25] Suprpto, Darsono, S. P. Djoko, and Djasiman, "Analisa Sistem Hampa Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA," Pertemuan dan Presentasi Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Yogyakarta, 2000.
- [26] Suprpto, Sukidi, Sukaryono, S. Atmojo, and Djasiman, "Analisis Kehampaan Corong Pemayar Mesin Berkas Elektron," Pertemuan dan Presentasi Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Yogyakarta, 2003.
- [27] "https://www.edwardsvacuum.com/CatalogFlipbook/files/assets2/common/downloads/Edwards_Product_Catalogue.pdf", diakses, 21-6-2017.