



DASAR DISAIN SISTEM VAKUM MESIN BERKAS ELEKTRON (MBE)

Darsono, Suprpto, Djasiman

PPNY-BATAN JL. Babarsari P.O. Box 1008, Yogyakarta 55010

ABSTRAK

DASAR DISAIN SISTEM VAKUM MESIN BERKAS ELEKTRON (MBE). Sistem vakum merupakan bagian utama MBE karena tanpa ini elektron tak dapat diproduksi. Sistem vakum terdiri dari pompa vakum, ruang vakum, pipa penghubung, kran dan tera vakum. Untuk mendisain sistem vakum MBE diperlukan pengetahuan dasar teknologi vakum. Pada makalah ini dijelaskan jenis-jenis pompa vakum, perhitungan konduktansi pipa dan waktu pemompaan sistem vakum kemudian dikaitkan dengan kriteria pemilihan pompa vakum MBE. Dari telaah studi disimpulkan bahwa untuk MBE 500 keV/10 mA yang nantinya akan diaplikasikan untuk pelapisan kayu maka dengan memperhatikan faktor teknis dan ekonomis maka sebaiknya memakai pompa difusi.

ABSTRACT

DESIGN FONDATION OF VACUUM SYSTEM FOR ELECTRON BEAM MACHINE. Vacuum system is a main part of electron beam Machine because (EBM) the electron can not be produced without this vacuum. Vacuum system consists of vacuum pump, connecting pipe, valve, and vacuum gauge. The design vacuum system of EBM, basis knowledge and technology of vacuum is needed. The paper describes types of vacuum pump, calculation of pipe conductance and pumping time of vacuum system then there are used as consideration of criteria to choose vacuum pump for EBM. From the result of study, it is comeloded that for EBM of 500 keV/ 10 mA which is going to use for wood coating and with consideration of economic and technis factor it is better to use diffusion pump.

PENDAHULUAN

Salah satu bagian utama mesin berkas elektron (MBE) adalah sistem vakum karena tanpa ini berkas elektron sukar dihasilkan. Sistem vakum lebih mempengaruhi terhadap watak keluaran MBE dibanding komponen lainnya. Sistem vakum MBE terdiri dari pompa vakum, ruang vakum, pipa penghubung, kran dan tera vakum. Mengingat MBE sangat luas aplikasinya maka pompa vakum tinggi dan konstruksi sistem vakum merupakan kriteria pemilihan disain. Misal jika MBE diaplikasikan untuk pembuatan lapisan tipis maka kontaminasi uap oli dari pompa harus dihindari. Untuk menghindari ini, biasanya dipasang "cold trap" dan "baffles" diantara pompa vakum tinggi dan ruang vakum (chamber). Sebaliknya jika MBE diaplikasikan untuk "welding" dan "melting" maka pemasangan "cold trap" dan "baffles" tidak perlu karena efisiensi pemompaan lebih serius dari pada kontaminasi. Beban pemompaan juga merupakan dasar yang digunakan untuk pemilihan ukuran pompa vakum tinggi. Makin besar volume ruang vakum yang akan divakumkan makin besar pula ukuran pompa vakum tinggi yang sebaiknya digunakan.

Operasi sistem vakum MBE berkisar 10^{-5} s/d 10^{-8} Torr tergantung aplikasi MBE, yang hanya

dapat dihasilkan oleh pompa vakum tinggi. Untuk mendisain sitem vakum MBE diperlukan pengetahuan dasar teknologi vakum. Pada makalah ini diuraikan definisi besaran yang penting pada sistem vakum, jenis-jenis pompa vakum tinggi beserta watak kecepatan pemompaannya, perhitungan konduktansi pompa, perhitungan waktu pemompaan sistem vakum, dan komponen vakum yang dikaitkan dengan kriteria pemilihan pompa vakum MBE.

DASAR TEORI VAKUM

Besaran Penting Sistem Vakum

Untuk membahas sistem vakum perlu diketahui beberapa definisi besaran penting pada sistem vakum, misal besaran pada watak pompa vakum yang dapat dijumpai pada katalog pompa vakum. Definisi besaran penting perlu dipahami untuk mengkalkulasi dan menginstal sistem vakum.

Besaran-besaran itu adalah:

1. Throughput: kuantitas gas dalam satuan volume x tekanan yang melewati suatu bidang per satuan waktu.
2. Mass flow (aliran massa): kuantitas masing-masing molekul dalam satuan kg.mol yang melewati bidang persatuan waktu.

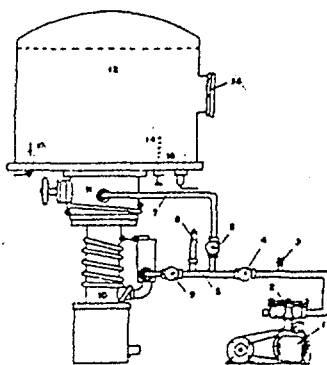
3. Volume flow rate (laju aliran volume): volume gas yang melewati suatu bidang per satuan waktu pada temperatur dan tekanan tertentu.
4. Pumping speed (kecepatan pemompaan): laju volumetrik gas yang dilewatkan suatu bidang atau throughput dibagi tekanan pada bidang tera vakum.
5. Conductance (konduktansi): throughput dibagi penurunan tekanan sepanjang komponen misal pipa penghubung
6. Ultimate pressure (tekanan ultima): harga tekanan vakum terendah yang dapat dicapai pada uji standar AVS (American Vacuum Society).

Kalkulasi Sistem Vakum

Contoh instalasi sistem vakum terlihat pada gambar-1 terdiri dari pompa rotari, pompa difusi, ruang vakum dan komponen vakum. Terlihat bahwa pipa penghubung pada sistem vakum ada yang berbentuk tabung dan bentuk siku. Hal ini tentu mempunyai konduktansi yang berbeda. Besarnya konduktansi berbagai bentuk dapat dijumpai diberbagai literatur (1, 2). Untuk mengkalkulasi sistem vakum misal jika akan menentukan waktu pemompaan sistem vakum maka pengetahuan mengenai kecepatan pemompaan pompa vakum, sumber gas yang ada dalam sistem vakum, konduktansi sistem vakum, volume ruang vakum harus diketahui dengan pasti.

Kecepatan pemompaan pompa vakum

Kecepatan pemompaan didefinisikan sebagai gas throughput dibagi tekanan pada bidang dari tera tekanan.

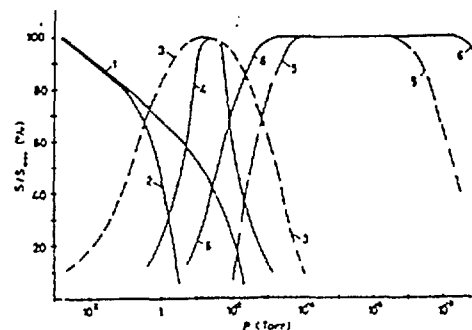


Gambar 1. Instalasi sistem vakum

Keterangan :

1. Pompa rotari
2. Penangkap uap air
3. Kran pembocor udara
4. Kran pompa rotari
5. Saluran "backing"
6. Kran vakum rendah
7. Penghubung vakum rendah Penning
8. "Head Pirani"
9. Kran "backing"
10. Pompa difusi
11. Kran vakum tinggi
12. Ruang vakum
13. Terminal kabel listrik
14. Penyekat poros "seal"
15. "Head"
16. Jendela

Untuk menentukan kecepatan pemompaan suatu pompa vakum dilakukan dengan cara pengukuran uji standar AVS (American Vacuum Society). Kecepatan pemompaan suatu pompa vakum penting dalam mengkalkulasi dan menginstal sistem vakum karena akan menentukan lama pemompaan. Gambar-2 memperlihatkan kecepatan berbagai jenis pompa.



Gambar 2. Kecepatan pemompaan berbagai pompa vakum

Keterangan:

1. Pompa rotari satu tingkat tanpa gas ballast.
2. Pompa satu tingkat dengan gas ballast.
3. Pompa root's.
4. Pompa pancaran
5. Pompa difusi
6. Pompa turbo molekuler

Jika kecepatan pemompaan pompa vakum pada masukan dan konduktansi pipa penghubung diketahui maka kecepatan pemompaan pada ruang vakum (chamber) dapat dihitung. Atau waktu yang diperlukan untuk memvakumkan ruang vakum pada volume tertentu dapat dihitung. Dari gambar 2 suatu hal yang perlu diperhatikan ialah dalam

pemilihan pompa muka (fore pump) misal pompa rotari untuk pompa vakum tinggi dari pompa difusi atau turbomolekul. Untuk menghasilkan tekanan vakum operasi ultima yang cepat maka harus dipilih pompa muka dengan kevakuman serendah mungkin.

Kalkulasi konduktansi bentuk tabung

- 1) Untuk gas dalam rentang kekentalan (viscous)
Besarnya konduktansi ini untuk aliran kental (viscous) ialah

$$C = \pi/128 [D^4/\eta L] \bar{P}$$

dalam satuan cgs

secara praktis ditulis $C = 3,27 \times 10^{-2} [D / (\eta L)] \bar{P}$
dimana :

P = tekanan rata pada tabung = $(P1 + P2)/2$
(Torr)

L = panjang tabung (cm)

D = diameter tabung (cm)

η = koefisien kekentalan (Poise)

P1 & P2 = tekanan pada masing-masing ujung tabung.

- 2) Untuk gas dalam rentang molekuler

Pada rentang ini molekul-molekul bergerak lurus secara acak diantara tumbukan dengan dinding tabung. Dengan mengasumsi bahwa kecepatan hanyut molekul merata dan mengikuti distribusi Maxwell-Boltzman, Knudsen menyatakan bahwa

$$C = 3,81 (TM)^{1/2} (D^2/L)$$

dengan: T = suhu, M = massa gas

Untuk udara pada temperatur 20°C $(TM)^{1/2} : 3,18$

jadi $C = 12,1 D^3 / L$ (liter/sec.)

D & L dalam cm. Terlihat bahwa untuk rentang molekuler konduktansi tidak tergantung tekanan.

Sumber gas dalam sistem vakum

Suatu sistem vakum terdiri dari pompa vakum, teravakum, kran (valve) dan pipa-pipa yang menciptakan daerah bertekanan rendah. Untuk mengekspresikan watak sistem vakum pada aksi pemompaan, berbagai sumber gas yang ada dalam sistem harus dipertimbangkan. Sumber gas dalam sistem vakum adalah:

- a) Molekul gas pada tekanan awal atmosfer dalam sistem (Q).
- b) Gas menerobos sistem akibat bocor (QL).
- c) Gas dari "outgassing" bahan sistem (QD) pada ruang vakum.
- d) Gas/uap berasal dari tekanan uap bahan pada ruang vakum (Qv)

- e) Gas masuk ke sistem dengan menembus dinding, window bahan sistem (bukan karena bocor) (Qp).

Kuantitas gas berasal dari b) s/d e) merupakan fungsi konstruksi sistem vakum.

Jumlah total gas dalam sistem (QG)

$$Q_G = Q_L + Q_D + Q_v + Q_p$$

untuk interval waktu tertentu konstan.

Kalkulasi waktu pemompaan sistem vakum

- 1) Pemompaan dalam rentang kekentalan (Viscous)

Dengan mengasumsikan kecepatan pemompaan pompa konstan maka kecepatan pemompaan dicapai melalui konduktansi pipa C yang menghubungkan pompa dan ruang dengan volume V.

$$\begin{aligned} \frac{t}{V} = & \frac{1}{E} \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{P_i} \right) + \frac{[(Sp/E)^2 + P^2]^{1/2}}{P} \\ & + \frac{1}{Sp} \left[\frac{[(Sp/E) + P^2]^{1/2}}{P} - \frac{[(Sp/E) + P_i^2]^{1/2}}{P_i} \right] \\ & + \frac{1}{Sp} \left[\ln \frac{P_i + [(Sp/E)^2 + P_i^2]^{1/2}}{P + [(Sp/E)^2 + P^2]^{1/2}} \right] \end{aligned}$$

P = tekana pada ruang (chamber) pada waktu t

Pi = tekanan awal

Sp = Kecepatan pemompaan pompa vakum

E diperoleh dari konduktansi pipa

$$C = (\pi/128) [D^4 / (ML)] [(P + Pp)/2]$$

$$C = E (P + Pp) / 2$$

$$\text{Jadi } E = (\pi/128) D / (\eta L)$$

dengan D = diameter pipa

L = panjang pipa

η = koefisien viskositas

Pp = tekanan pada masukan pompa

Jika pompa dihubungkan langsung (L=0) ke ruang, maka $D/L = \infty$ jadi $E = \infty$. Maka dari persamaan diatas waktu pemompaan pemvakuman

$$t = (V/Sp) \ln (P_i/P)$$

- 2) Pemompaan dalam rentang molekuler

Pemompaan dalam rentang molekuler dibatasi oleh kesetimbangan antara beban gas dan kecepatan pemompaan itu sendiri juga kesetimbangan dalam ruang vakum. Waktu yang diperlukan untuk memvakumkan dari tekanan awal Pi menjadi P adalah

$$t = \frac{V}{Sp} \left(1 + \frac{Sp}{C} \right) \ln \frac{P_i - P_u}{P - P_u}$$

dimana Sp = kecepatan pemompaan

C =

konduktansi pipa antara ruang vakum dan masukan pompa

P_u = Tekanan ultima ruang vakum (tekanan vakum maksimum yang dapat dicapai)

V = Volume ruang vakum

Persamaan diatas menganggap bahwa S_p konstan dan tidak tergantung pada P . Juga menganggap bahwa tekanan terendah pada pompa sangat kecil jika dibandingkan P_u . Persamaan diatas dapat ditulis menjadi

$$P = (P_i - P_u) \exp. \{ -(S_p/V)t / (1 + S_p/C) \} + P_u$$

Terlihat bahwa untuk waktu pemompaan yang lama tekanan P menuju P_u ditentukan beban gas. Jadi menggambarkan pemompaan transien.

$$P = P_i \exp [-(S/V)t]$$

dan keadaan ajeg

$$P = P_u = Q_G / S$$

S = kecepatan pemompaan sistem vakum

$S/V = 1/\tau$, τ = konstanta waktu pemompaan

Harga τ waktu pemompaan yang mengurangi tekanan pada nisbah tertentu. Misal waktu yang diperlukan untuk memvakumkan tekanan 10 kali tekanan mula

$$t_{1/2} = 2,3 (V/S)$$

JENIS POMPA VAKUM

Untuk memvakumkan suatu sistem vakum digunakan suatu pompa vakum. Secara garis besar pompa vakum dibagi menjadi 3 jenis pompa antara lain:

1. Pompa-pompa mekanik
2. Pompa uap
3. Pompa-pompa ionik dan sebagainya.

Dalam makalah ini dibahas dua jenis pompa yaitu pompa-pompa mekanik dan pompa-pompa uap, sedangkan pompa yang lain tidak dibahas.

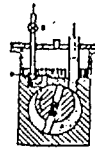
Pompa-pompa mekanik

Macam-macam pompa mekanik yang banyak digunakan untuk pompa vakum adalah: pompa sudu (vane) putar, pompa sudu luncur, pompa putar pengisap, pompa root's dan pompa turbo molekuler. Bagan pompa-pompa ini ditunjukkan pada gambar-3.

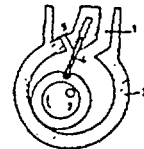
Pompa sudu putar (gambar-3a) mempunyai dua sudu yang berputar didalam stator berbentuk silindris secara eksentrik, pompa ini banyak digunakan untuk pompa pra vakum. Kevakuman

akhir yang dapat dicapai adalah 10^{-2} Torr untuk pompa satu tingkat dan 10^{-4} Torr untuk pompa dua tingkat.

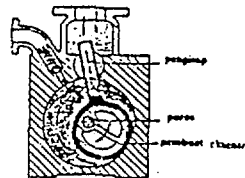
Sedangkan pompa sudu luncur (gambar-3b) hanya mempunyai satu sudu untuk memisahkan ruangan didalam silinder menjadi dua bagian yaitu sisi masuk dan sisi keluar. Pada operasinya rotor berputar secara eksentrik sehingga menyebabkan perubahan volume ruangan disisi masuk dan keluar. Perubahan volume ini menyebabkan langkah isap dan langkah keluar.



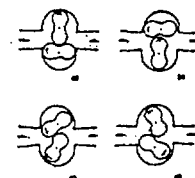
a. pompa sudu putar



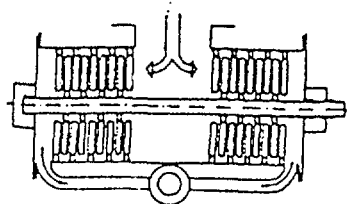
b. pompa sudu luncur



c. pompa putar pengisap



d. pompa root's



e. pompa turbo molekuler

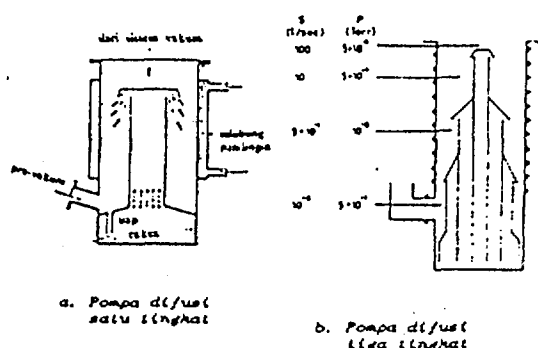
Gambar-3 : Bagan pompa-pompa mekanik

Untuk pompa putar pengisap (gambar-3c) prinsip kerjanya sama dengan pompa sudu luncur. Untuk pompa root's (gambar-3d) biasanya digunakan sebagai pompa booster yaitu dipasang diantara pompa pra vakum dan pompa difusi atau pompa turbo molekuler. Daerah kerja pompa root's berkisar dari 10 Torr sampai 10^{-4} Torr. Untuk memindahkan gas yang dipompa, digunakan dua penolak (baling-baling) yang berputar satu sama lain dengan beda fase 90° didalam rumah pompa. Sedangkan pompa turbo molekuler (gambar-3e) terdiri atas celah-celah sudu bertingkat dalam arah aksial yang berputar dan sudu-sudu tetap pada cakram. Kecepatan keliling sudu yang berputar sangat tinggi yaitu sekitar 80 m/detik. Pompa ini

biasanya mempunyai beberapa tingkat yaitu sekitar 9 tingkat. Perbandingan kompresi tiap tingkat sekitar 5, sehingga dengan jumlah tingkat ini mempunyai perbandingan kompresi 5^9 . Pompa turbo molekul mampu memberikan tekanan ultima 10^{-10} Torr. Pompa ini memerlukan pompa muka dengan tekanan vakum 10 Torr agar dapat dioperasikan. Keunggulan pompa turbo molekul terhadap pompa vakum lainnya ialah waktu pengoperasian cepat, kontaminasi uap oli rendah, perawatan relatif mudah. Namun struktur bahan sudu bisa berubah sehingga perlu pengecekan minimal 2 tahun sekali. Disamping itu sudu ini bisa patah bila terjadi kotoran di antara celah sudu tetap dan putar.

Pompa uap (pompa difusi)

Bagan pompa difusi ditunjukkan pada gambar 4. Pada pompa difusi ini minyak difusi ditempatkan pada bagian bawah (bejana didih), selanjutnya minyak difusi dipanaskan sampai terjadi pendidihan. Akibatnya uap minyak difusi naik ke atas melalui tabung tengah dan selanjutnya dengan dipasangnya "nozle" (celah sempit) uap minyak difusi akan memancar ke arah sisi pompa membentuk tabir uap. Pada dinding-dinding pompa difusi dipasang suatu pendingin untuk mendinginkan uap minyak difusi tersebut. Akibat pendinginan ini uap minyak difusi mengembun dan kembali ke bejana didih. Pancaran uap minyak difusi ini menyebabkan moleku-molekul gas disekitar "nozle" tertarik ke bawah bersamaan uap minyak difusi. Dengan demikian akan terjadi penghampaan ruangan di atas tabir dan begitu pula ruangan sistem yang dihubungkan. Pompa ini memerlukan pompa muka dengan tekanan vakum 10 Torr agar dapat dioperasikan.



Gambar 4 : Bagan pompa difusi

KRITERIA SELEKSI POMPA VAKUM MBE

Kriteria seleksi pompa vakum untuk MBE biasanya memperhatikan beberapa kriteria berikut ini yaitu:

1. Tekanan operasi ultima MBE orde 10^{-5} - 10^{-8} Torr
2. Segi aplikasi MBE
3. Volume ruang vakum MBE
4. Ekonomi

Agar berkas elektron dapat diproduksi, diperlukan vakum tinggi yaitu minimum orde 10^{-3} Torr, ini merupakan syarat mutlak. Biasanya digunakan pompa difusi atau pompa turbomolekul. Kemudian MBE mempunyai aplikasi yang sangat luas, apabila MBE diaplikasikan untuk pembuatan lapisan tipis maka faktor kontaminasi dari pompa vakum ke ruang vakum harus diperhatikan. Untuk keperluan aplikasi ini biasanya digunakan pompa turbomolekul karena pompa ini mempunyai proteksi uap oli ke ruang vakum paling rendah dibanding pompa lainnya. Apabila akan memakai pompa difusi maka perlu dipasang "cold trap" dan "baffles" antara pompa difusi dan ruang vakum. Namun ini berarti menambah ruang vakum dan akan mengakibatkan waktu pemompaan sistem vakum lama. Untuk aplikasi MBE selain lapisan tipis faktor kontaminasi uap oli pompa vakum ke ruang vakum tidak begitu serius. Walaupun faktor kontaminasi harus ditekan serendah mungkin karena jika tidak maka uap oli ini lama-lama akan melapisi window keluaran berkas elektron. Jika ini terjadi maka daya henti dari window menjadi besar, ini berarti tenaga berkas elektron akan berkurang.

Hal lain yang perlu diperhatikan dalam pemilihan pompa vakum adalah volume ruang vakum MBE. Hal ini berhubungan dengan ukuran pompa vakum atau kecepatan pemompaan. Untuk mendapatkan kecepatan pemompaan yang cepat maka diperlukan pompa vakum ukuran besar untuk volume yang besar. Namun bisa menggunakan pompa vakum ukuran menengah apabila menggunakan pompa turbo molekul, karena dewasa ini telah diproduksi pompa turbomolekul dengan kecepatan rotor sampai dengan 42000 RPM.

Hal yang paling penting dalam pemilihan pompa vakum untuk MBE ialah segi EKONOMI, baik dari segi harga alat, maupun perawatan. Dari segi harga pompa turbo molekul lebih mahal jika dibanding dengan pompa difusi, demikian juga dari segi perawatan pompa difusi lebih mudah. Dari segi umur alat kedua pompa ini berimbang. Beberapa keunggulan pompa turbo molekul dibandingkan dengan difusi ialah pengoperasian pompa vakum

lebih cepat dan sederhana juga polusi uap oli ke sistem vakum lebih rendah.

KESIMPULAN

Dari uraian diatas maka untuk MBE 500 keV/10 mA yang nantinya akan diaplikasikan untuk pelapisan kayu maka dengan memperhatikan faktor teknis dan ekonomis maka sebaiknya memakai pompa difusi.

ACUAN

1. ROTH, A Vacuum Technologi. North-Holand Publishing Company, 1976.
2. O'HANLON, JOUN f.A User's Guide to Vacuum Technology, John Wiley & Sons, 1989.
3. ROL. P. K. , Teknik Vakum, Gajah Mada University Press, 1977.

TANYA JAWAB

Sudarti

Kebutuhan vacum MBE untuk suatu tujuan dalam aplikasinya masing-masing adalah sudah tertentu (menurut masing-masing kebutuhan).

Mengingat vacum tersebut adalah sudah tertentu besarnya, sehingga dapat dipilih sistem vakum yang tertentu pula . Apakah permasalahan "dasar disain sistem vacum MBE" tersebut akan diangkat ?

Darsono

Permasalahan dasar disain sistem vakum MBE dibahas, dalam rangka pemilihan pompa vakum tinggi yang tepat sesuai dengan aplikasi MBE 500 keV/ 10 mA. Dan perlu diketahui bahwa sistem vakum dan pompa vakum sangat berbeda

Tri Mardji Atmono

Selama ini yang saya ketahui sebagai peneliti kita menggunakan pompa vakum dengan mudah membeli bukan dengan membuat sendiri. Tetapi bapak menyajikan makalah/uraian tentang pompa vakum dan disainnya. Apakah relevansinya dengan perancangan mesin berkas elektron ? mohon penjelasan

Darsono

Kami tidak akan mendisain pompa vakum tetapi merancang (disain) sistem vakum. Pada sistem vakum ada pompa vakum dan ini kita beli namun agar pemilihan pompa vakum dengan tepat perlu dipahami dasar desain sistem vakum