

RANCANGAN SISTEM VAKUM TINGGI PERANGKAT IRADIATOR ELEKTRON PULSA

Bambang Siswanto dan Ihwanul Aziz
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb 55010
email: bambangsis@batan.go.id

ABSTRAK

RANCANGAN SISTEM VAKUM TINGGI PERANGKAT IRADIATOR ELEKTRON PULSA. Telah dilakukan perhitungan beban pompa yang meliputi volume bejana plasma, beban gas dan konduktivitas saluran. Beban gas terdiri dari pelepasan gas (outgassing), permeasi dan kebocoran, sedangkan konduktivitas saluran meliputi below, valve-valve, Lbow dan crossjoint. Rancangan sistem vakum ini bertujuan untuk memperoleh pemakaian sistem vakum yang efisien. Hasil perhitungan beban gas untuk pompa rotari = $7,33 \times 10^{-2}$ Torr liter/detik dan pompa turbo molekular = $4,8 \times 10^{-5}$ Torr liter/detik, konduktivitas saluran aliran viscous = $20,24 \text{ cm}^3/\text{detik}$ dan aliran molekular = $295 \text{ cm}^3/\text{detik}$. Diperoleh kevakuman akhir $1,25 \times 10^{-6}$ Torr dengan pemompaan efektif $24 \text{ m}^3/\text{jam}$ (pompa rotari DUO 20) dan 665 liter/detik (turbo molekular HiPace® 700 M), serta waktu pemompaan sekitar 15 menit.

Kata kunci : konduktansi, permeasi, outgassing, vakum

ABSTRACT

DESIGN OF HIGH VACUUM SYSTEM FOR PULSE ELECTRON IRADIATOR DEVICES. Pump load calculations have been made which includes the volume of plasma vessel, the gas load and the channel conductivity. Gas loads consists of the release of gases (outgassing), permeation and leaks, while the channel conductivity includes the below, valves, Lbow and cross joint. The vacuum system design aims to obtain an efficient vacuum systems. The calculation result for rotary pump gas load = 7.33×10^{-2} torr liter/sec and turbo molecular pump = 4.8×10^{-5} torr liter/sec, viscous flow channel conductivity = $20.24 \text{ cm}^3/\text{sec}$ and molecular flow = $295 \text{ cm}^3/\text{sec}$. The final vacuum is 1.25×10^{-6} Torr with an effective pumping speed of $24 \text{ m}^3/\text{h}$ (DUO 20 rotary pump) and 665 liter/sec (turbo molecular HiPace® 700 M), and the pumping takes about 15 minutes.

Keywords : conductance, permeation, outgassing, vacuum

PENDAHULUAN

Aplikasi Mesin Berkas Elektron (MBE) pulsa sangat luas, dalam bidang industri MBE pulsa dapat digunakan untuk iradiasi lateks, modifikasi permukaan pada industri semikonduktor dan polimer, serta pada industri pangan untuk pasteurisasi tanpa merusak tekstur dan nutrisi, juga netralisasi limbah [1,2]. Dalam tahun 2015 dilakukan perancangan perangkat iradiator elektron berbasis pulsa berbasis sumber elektron katoda plasma (IEP-SEKP) terdiri atas beberapa bagian pokok diantaranya adalah sistem bejana iradiator, sistem vakum tinggi [3], sistem ekstraksi elektron, sistem emisi dan sistem deteksi berkas elektron.

Sistem iradiator elektron pulsa terdiri dari bejana iradiator yang dilengkapi dengan housing isolator HV dan sistem foil windows, sistem vakum tinggi, sistem ekstraksi yaitu catudaya tegangan tinggi dan sistem kapasitor bank, sistem emisi yang terdiri elektrode ignitor, elektroda generator plasma dilengkapi sistem grid, catudaya plasma yang terdiri atas catuya ignitor (IDPS) dan catudaya generator

plasma (ADPS), dan sistem deteksi berkas elektron pulsa dengan menggunakan koil rogowski dan faraday cup.

Sistem vakum digunakan untuk memvakumkan bejana iradiator dan ruangan sistem plasma yaitu tempat pembangkit plasma atau pembangkit sumber elektron pada tingkat kevakuman tertentu, tingkat kevakuman ini berkaitan dengan bahan komponen-komponen vakum yang digunakan, cara penginstalan dan laju pemompaan, beban gas, konduktansi saluran, laju pemompaan efektif dan tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai. Waktu pemvakuman tergantung jenis pompa vakum yang digunakan, beban gas yang dipindahkan, sistem saluran, tingkat kebocoran dan tingkat kevakuman akhir yang dikehendaki [4-6]. Beban gas ini meliputi pelepasan gas (outgassing), kebocoran dan permeasi. Besar laju pelepasan gas akan berkurang terhadap waktu pemompaan sehingga kehampaan semakin bertambah dan akan mencapai kondisi mantap (steady state). Pada kondisi ini, beban gas hanya disebabkan oleh adanya pelepasan gas (outgassing), permeasi dan kebocoran [7-10]. Tingkat kevakuman

akhir yang ingin dicapai adalah sekitar 10^{-5} Torr, oleh karena itu diperlukan pompa awal (rotary) dan pompa lanjutan turbo molekuler atau pompa difusi dan waktu pemompaan juga dipengaruhi kapasitas pompa yang digunakan.

DASAR TEORI

1. Beban Pompa

Beban gas pada sistem vakum adalah permeasi, kebocoran, *outgasing*.

a. Permeasi

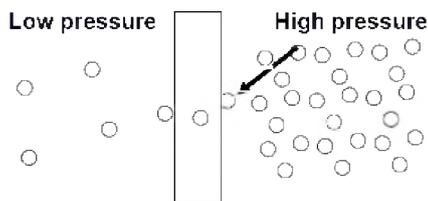
Permeasi merupakan suatu proses masuknya molekul-molekul/atom-atom gas dari permukaan luar (tekanan atmosfer) ke permukaan dalam yang harus divakumkan, seperti terlihat pada Gambar 1. Berdasarkan hukum Fick's pertama dan kedua serta melalui penjabaran secara matematis maka laju permeasi spesifik (q_p) dapat dihitung dengan persamaan (1):

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

Dengan D_1 adalah koefisien difusi, b konstanta kelarutan, P_1, P_2 tekanan di sisi permukaan luar dan dalam, h tebal dinding dan n konstanta desosiasi ($n = 1/2$ untuk diatomic gas dalam metal). Perkalian antara koefisien difusi dan konstanta kelarutan yaitu D_1 dan b disebut konstanta permeasi (K). Besar laju permeasi yang terjadi (Q_p) ditentukan dengan persamaan (2).

$$Q_p = q_p A \quad (2)$$

dimana A adalah luas permukaan ruang vakum.



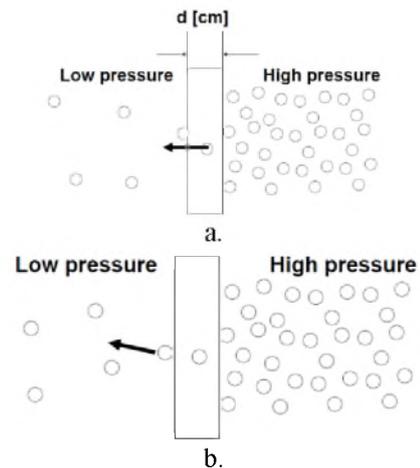
Gambar 1. Proses terjadinya permeasi

b. Pelepasan Gas (*adsorsi dan desorpsi*)

Ketika material diletakkan dalam ruang vakum maka terjadi adsorpsi gas pada permukaan material tersebut. Desorpsi dipengaruhi oleh tekanan, temperatur, bentuk maupun permukaan material dan gas yang disebabkan oleh adanya adsorpsi dan desorpsi disebut pelepasan gas (*outgassing*). Setelah divakumkan, molekul/atom tersebut keluar dan lepas dari permukaan sehingga memberikan sumbangan gas di dalam sistem vakum. Desorpsi terjadi jika suatu molekul/atom gas menempel pada permukaan

tetapi tidak sampai masuk ke dalam permukaan, yang selanjutnya jika divakumkan molekul/atom gas tersebut lepas dari permukaan dan memberikan sumbangan gas di dalam sistem vakum. Besar laju pelepasan gas yang terjadi (Q_D) ditentukan dengan persamaan (3) :

$$Q_D = q_d \cdot A \quad (3)$$



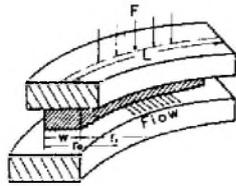
Gambar 2. Proses terjadinya a) driven difusion dan b) desorpsi

c. Penguapan

Penguapan bahan di dalam sistem vakum disebabkan karena adanya tekanan yang sangat rendah (kevakuman tinggi) pada suhu ruangan. Untuk bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan komponen-komponen sistem vakum, penguapan akan terjadi bila tekanan parsial yang mengenai permukaan lebih kecil dari tekanan penguapan dari bahan tersebut. Dan besar laju pelepasan gas akibat penguapan ditulis dengan notasi Q_v .

d. Kebocoran

Kebocoran pada sistem vakum terjadi pada sambungan komponen-komponen yang digunakan di dalam sistem vakum. Sambungan komponen-komponen ini dibedakan menjadi 2 bagian yaitu sambungan tetap dan sambungan variabel. Sambungan tetap yaitu sambungan dengan las dan brazin, dan pada sambungan jenis ini kebocoran yang terjadi sangat sulit ditentukan karena tergantung dari kualitas sambungan tersebut. Untuk sambungan variabel yaitu sambungan yang dapat dilepas dan biasanya menggunakan perapat (seal) logam atau viton seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sambungan dengan perapat viton

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. Besar konduktansi pada perapat viton dapat ditentukan dengan persamaan (4):

$$C = 4 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} A_t^2 \frac{L}{W} \exp \left(- \frac{3F}{LwR} \right) \quad (4)$$

Dengan L adalah keliling perapat viton (cm), M berat molekul nitrogen, T temperatur ruangan ($^{\circ}\text{K}$), w lebar kontak viton (cm), F gaya pengencangan baut (kg) dan R faktor *seal*. Sedangkan perapat menggunakan logam dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5).

$$C = 1,93 \cdot 10^4 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \frac{2\pi}{\ln(r_o/r_l)} \frac{A_t^2}{8,12} \exp \left(\frac{e^{-3p/r}}{1-0,36e^{-3p/r}} \right) \quad (5)$$

Dengan r_o adalah jari-jari luar seal (cm) r_l jari-jari dalam *seal* (cm) P tekanan karena pengencangan baut. Selanjutnya besar laju kebocoran (QL) dapat ditentukan dengan persamaan (6)

$$Q_L = C \cdot \Delta P \quad (6)$$

Dengan demikian besar beban pompa (QG) untuk kondisi mantap adalah

$$QG = QP + QD + QV + QL \quad (7)$$

2. Sistem Saluran

Konfigurasi dan dimensi saluran dalam instalasi sistem vakum sangat berkaitan dengan besar daya hantar (konduktansi). Untuk menentukan besar konduktansi harus diketahui jenis aliran yang terjadi di dalam saluran tersebut. Jenis aliran ini ditentukan berdasarkan bilangan Knudsen yaitu perbandingan antara diameter saluran (D) dan lintasan bebas rata-rata (λ) yang dapat dituliskan. Aliran di dalam sistem vakum diklasifikasikan menjadi 3 bagian yaitu aliran kental (viscous) dengan $D/\lambda > 110$, aliran transisi dengan $1 < D/\lambda < 110$ dan aliran molekular dengan $D/\lambda < 1$ [1]. Untuk kevakuman rendah yaitu saat pemompaan dengan pompa awal rotari, aliran yang terjadi adalah aliran kental (viscous). Tetapi untuk kevakuman tinggi yaitu saat pemompaan dengan pompa difusi atau turbomolekul, aliran yang terjadi adalah aliran molekular. Dengan demikian,

konduktansi yang terjadi ditentukan sesuai jenis alirannya. Besar konduktansi (C) untuk aliran kental (viscous) pada pipa panjang dengan penampang tetap adalah (8):

$$C = 180 \frac{P D^4}{L} \quad (8)$$

Besar konduktansi untuk aliran molekular pada pipa panjang dengan penampang tetap adalah (9)

$$C = \left(\frac{12 \times D^3}{L} \right) \quad (9)$$

Dengan C adalah konduktansi saluran (liter/detik), D diameter saluran (cm), L panjang saluran (cm) dan P tekanan (Torr).

Untuk komponen-komponen vakum lainnya konduktansi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 10, 11 dan 12

Valve

$$C = \left(\frac{12,50 \times D^4}{L} \right) \quad (10)$$

Cross-section

$$C = 3,81 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \frac{D^4}{L} \quad (11)$$

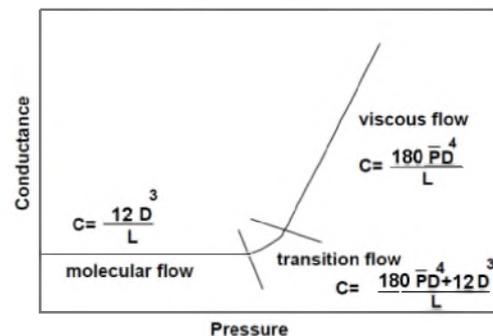
Lbow

$$C = 3,81 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \frac{D^3}{L_1 + L_2} \quad (13)$$

Konduktansi total dihitung dengan menggunakan persamaan 14 untuk sambungan seri dan persamaan 15 untuk sambungan parallel.

$$\frac{1}{C_{Total}} = \sum \frac{1}{C} \quad (14)$$

$$C_{Total} = \sum C_i \quad (15)$$



Gambar 4. Konduktansi sebagai fungsi tekanan

3. Kevakuman akhir

Kevakuman akhir berkaitan dengan waktu pemompaan pada kondisi transisi dan berkaitan dengan beban gas pada kondisi mantap (*steady state*). Tingkat kevakuman (P) sebagai fungsi waktu pemompaan adalah (10):

$$P = (P_i - P_u) \exp \left\{ - \left(\frac{S_p}{V} \right) t \right\} \left[1 + \left(\frac{S_p}{C} \right) \right] + P_u \quad (10)$$

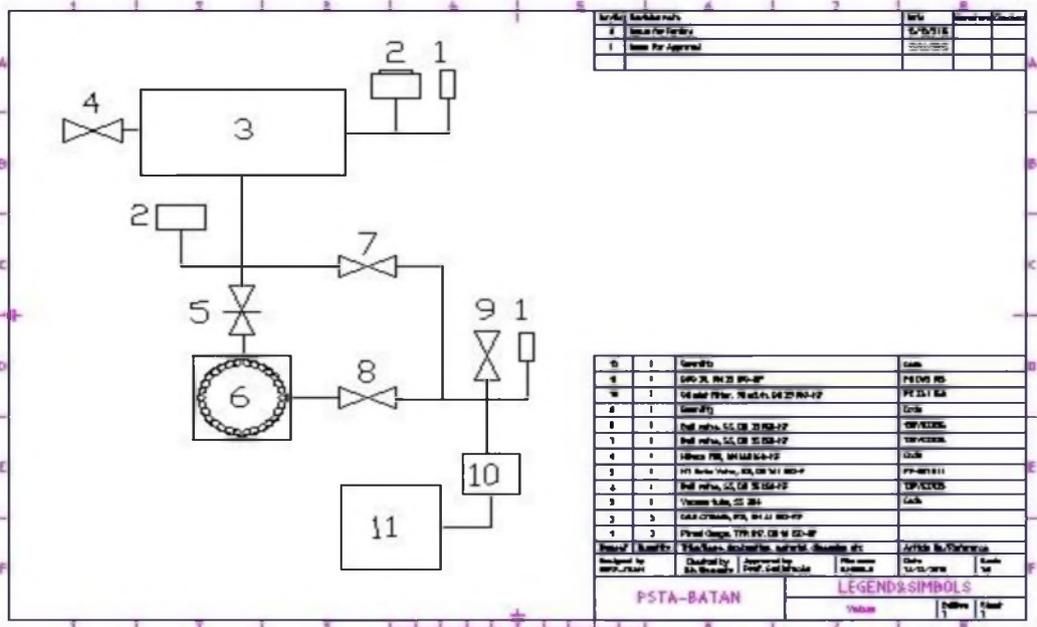
dengan P_i adalah kevakuman awal (Torr), P_u kevakuman akhir (Torr), S_p laju pemompaan teoritis (lt/detik), V volume ruang yang divakumkan (liter) dan t waktu pemvakuman (detik). Kevakuman akhir pada kondisi mantap (P_u) dihitung dengan persamaan (11)

$$P_u = \frac{Q_G}{S_{ef}} \quad (11)$$

dan

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C} \quad (12)$$

dengan S_f adalah laju pemompaan efektif (liter/detik). Skematik sistem vakum tinggi untuk perangkat iradiator elektron pulsa ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Skema sistem vakum tinggi dengan pompa lanjut turbo molekular

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Sistem Vakum Rotari

Tabel 1. Hasil perhitungan beban permeasi untuk beberapa komponen vakum

h (cm)	P_1 (Torr)	P_2 (Torr)	D_{Ib} (k)	A (cm ²)	qp (Torr ltr/detik cm ²)	Qp (Torr ltr/detik)	Ket.
0,5	$7,60 \times 10^2$	$5,00 \times 10^{-3}$	$1,67 \times 10^{-11}$	2207810	$9,16 \times 10^{-10}$	$2,02 \times 10^{-6}$	Ruang plasma
2	$7,60 \times 10^2$	$5,00 \times 10^{-3}$	$1,67 \times 10^{-11}$	12717	$2,29 \times 10^{-10}$	$2,91 \times 10^{-9}$	Flange
0,2	$7,60 \times 10^2$	$5,00 \times 10^{-3}$	$1,67 \times 10^{-11}$	157000	$2,29 \times 10^{-9}$	$3,59 \times 10^{-7}$	Blow
Jumlah				2377527		$2,38 \times 10^{-6}$	

Besar laju permeasi yang terjadi (Qp) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) dan hasil perhitungan permeasi disajikan pada Tabel 1.

Perhitungan besar laju permeasi spesifik (qp) ditentukan oleh tebal dan jenis bahan yang digunakan, makin tebal bahan yang digunakan akan makin kecil laju permeasi spesifiknya sesuai dengan

persamaan (1) dimana tebal bahan (h) berbanding terbalik dengan besar laju permeasi spesifik (qp). Bahan yang digunakan adalah stainless steel 304. Perhitungan laju permeasi juga ditentukan oleh luas permukaan yang kontak langsung dengan vakum, makin luas permukaan yang kontak dengan vakum akan makin besar laju permeasi yang terjadi sesuai dengan persamaan (1) yaitu luas permukaan berbanding lurus dengan besar laju permeasi. Hasil perhitungan laju permeasi pada tabung plasma diperoleh $2,38 \times 10^{-6}$ Torr liter/detik cm^2 . Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 1 terlihat bahwa, ketebalan bahan sangat berpengaruh. Hal ini karena ketebalan bahan dinding tabung plasma hanya 0,5 cm, sehingga laju permeasi lebih besar dibandingkan dengan laju permeasi flange yang mempunyai ketebalan 2 cm.

Untuk perhitungan beban akibat pelepasan gas (*outgasing*) terlebih dahulu harus diketahui laju pelepasan gas spesifik dan luas permukaan.

Tabel 3. Hasil perhitungan *outgassing* pada perapat viton

T	M	At	L	W	F	C	Ql
298	4	2,512	6,28	0,2	5	$2,8962 \times 10^{-7}$	0,00022
298	4	4,168	10,42	0,3	10	$9,6151 \times 10^{-5}$	0,073074

Dengan menggunakan persamaan (4) dan (5) dapat dilakukan perhitungan kebocoran akibat perapat (seal) yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3. Perapat yang digunakan pada sistem vakum sumber elektron katoda plasma adalah perapat viton dan kerja perapat viton pada kondisi deformasi elastis. Dengan demikian perapat viton dapat digunakan lebih dari satu kali karena jika perapat tersebut dilepas maka bentuknya kembali ke kondisi semula.

Beban gas akibat penguapan disebabkan karena adanya penguapan bahan di dalam sistem vakum pada tekanan yang sangat rendah (kevakuman tinggi). Untuk bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan komponen-komponen sistem vakum,

Tabel 2. Hasil perhitungan beban *outgassing* sistem bejana vakum

A (Cm^2)	qd (Torr liter/detik cm^2)	Qd (Torr liter/detik)
2377527	$2,0 \times 10^{-8}$	$4,76 \times 10^{-5}$

Pelepasan gas ini memberikan sumbangan beban pompa yang cukup besar, hal ini dikarenakan luas permukaan yang kontak langsung dengan vakum cukup besar.

Untuk memperkecil beban gas yang disebabkan oleh pelepasan gas dengan cara pengerjaan permukaan dibuat sangat halus dan menggunakan bahan yang porositasnya kecil dan perhitungan ini sudah didasarkan pada pengerjaan dan penggunaan bahan tersebut.

penguapan akan terjadi apabila tekanan parsial yang mengenai permukaan lebih kecil dari tekanan penguapannya. Bahan yang digunakan pada sistem vakum ini adalah stainless steel yang mana stainless steel mempunyai tekanan penguapan pada suhu ruangan dibawah 6×10^{-11} Torr, maka dengan kevakuman orde 10^{-6} Torr, belum terjadi penguapan. Dengan demikian beban gas akibat penguapan pada sistem vakum mesin nitridasi ion adalah nol ($Q_v = 0$).

Jadi dari hasil perhitungan beban yang meliputi beban akibat permeasi, pelepasan gas, kebocoran dan penguapan dapat dirangkum seperti ditunjukkan pada Table 4.

Tabel 4. Beban gas keseluruhan sistem vakum perangkat iradiator elektron pulsa

Qp (Torr lt/detik)	Qd (Torr lt/detik)	Ql (Torr lt/detik)	Qv (Torr lt/detik)	QG (Torr lt/detik)
$2,38 \times 10^{-6}$	$4,76 \times 10^{-5}$	0,073294	0	$7,33 \times 10^{-2}$

Tabel 5. Hasil perhitungan konduktansi komponen-komponen vakum

R (cm)	L (cm)	P (Torr)	C (cm^3/detik)	Keterangan
1,25	100	$3,80 \times 10^2$	$3,34 \times 10^3$	<i>below</i>
1,25	6		158,85	<i>valve</i>
1,25	15		85,64	<i>cross-section</i>
1,25	8		32,11	<i>Lbow</i>
		Ctotal	20,24	

Beban ini merupakan beban pompa (QG) pada kondisi mantap yaitu penjumlahan dari beban gas yang terjadi pada sistem vakum perangkat iradiator elektron pulsa. Untuk perhitungan konduktansi saluran hasilnya ditunjukkan pada Tabel.5.

Dengan pompa rotari DUO 20 kapasitas pemompaan 24 m³/jam, maka diperoleh kevakuman akhir $6,68 \times 10^{-3}$ Torr dengan waktu pemompaan sekitar 10 menit dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (10) - (11).

Perhitungan Sistem Vakum Turbo Molekular

Besar laju permeasi yang terjadi (Q_p) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) dan hasil perhitungan permeasi disajikan pada Tabel 6

Dengan menggunakan persamaan (4) dan (5) dapat dilakukan perhitungan kebocoran akibat perapat (*seal*) yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 6. Hasil perhitungan beban permeasi untuk beberapa komponen vakum

h (cm)	P_1 (Torr)	P_2 (Torr)	D_{ib} (k)	A (cm ²)	q_p (Torr ltr/detik cm ²)	Q_p (Torr ltr/detik)	Ket.
0,5	$5,00 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-6}$	$1,67 \times 10^{-11}$	2207810	$2,28 \times 10^{-12}$	$5,03 \times 10^{-9}$	Ruang plasma
2	$5,00 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-6}$	$1,67 \times 10^{-11}$	12717	$5,7 \times 10^{-13}$	$7,25 \times 10^{-12}$	Flange
0,2	$5,00 \times 10^{-3}$	$5,00 \times 10^{-6}$	$1,67 \times 10^{-11}$	157000	$5,7 \times 10^{-12}$	$8,95 \times 10^{-10}$	Blow
Jumlah				2377527		$5,94 \times 10^{-9}$	

Tabel 7. Hasil perhitungan outgassing pada perapat viton dengan kevakuman tinggi.

T	M	At	L	W	F	C	Q_l
298	4	2.512	6.28	0.2	5	2.9E-07	1.45E-09
298	4	4.168	10.42	0.3	10	9.62E-05	4.8E-07
Jumlah							4.82E-07

Beban gas akibat penguapan disebabkan karena adanya penguapan bahan di dalam sistem vakum pada tekanan yang sangat rendah (kevakuman tinggi). Untuk bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan komponen-komponen sistem vakum, penguapan akan terjadi apabila tekanan parsial yang mengenai permukaan lebih kecil dari tekanan penguapannya. Bahan yang digunakan pada sistem vakum ini adalah stainless steel yang mana stainless steel mempunyai tekanan penguapan pada suhu ruangan dibawah 6×10^{-11} Torr, maka dengan kevakuman orde 10^{-6} Torr, belum terjadi penguapan.

Dengan demikian beban gas akibat penguapan pada sistem vakum mesin nitridasi ion adalah nol ($Q_v = 0$)

Jadi dari hasil perhitungan beban yang meliputi beban akibat permeasi, pelepasan gas, kebocoran dan penguapan dapat dirangkum seperti ditunjukkan pada Tabel 8.

Beban ini merupakan beban pompa (QG) pada kondisi mantap yaitu penjumlahan dari beban gas yang terjadi pada sistem vakum perangkat iradiator elektron pulsa.

Untuk perhitungan konduktansi saluran hasilnya ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 8. Beban gas keseluruhan sistem vakum SEBKP

Q_p (Torr lt/detik)	Q_d (Torr lt/detik)	Q_i (Torr lt/detik)	Q_v (Torr lt/detik)	Q_G (Torr lt/detik)
$5,94 \times 10^{-9}$	$4,76 \times 10^{-5}$	$4,82 \times 10^{-7}$	0	$4,8 \times 10^{-5}$

Tabel 9. Hasil perhitungan konduktansi komponen-komponen vakum

R (cm)	L (cm)	P (Torr)	C (cm ³ /detik)	Keterangan
20	16,18	$2,50 \times 10^{-3}$	296,96	saluran
20	2	$2,50 \times 10^{-3}$	48000	valve
Ctotal			295.13	

Dengan pompa turbo molecular HiPace® 700 P kapasitas pemompaan 665 liter/detik, maka diperoleh kevakuman akhir $1,25 \times 10^{-6}$ Torr dengan waktu pemompaan sekitar 2 menit dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (10) - (11).

KESIMPULAN

Dari beberapa hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa beban gas karena terjadi permeasi, outgassing, penguapan dan kebocoran seal sebesar $7,33 \times 10^{-2}$ Torr Liter/detik dan $4,8 \times 10^{-5}$ Torr liter/detik untuk pompa rotari dan turbo molekuler, konduktivitas saluran, *valve-valve*, *crossjoint* dan *Elbow* sebesar 20,24 cm³/detik untuk aliran viscous, sedangkan untuk aliran molekuler sebesar 295 cm³/detik, kevakuman akhir yang dapat dicapai sebesar $1,25 \times 10^{-6}$ Torr dengan waktu pemompaan sekitar 15 menit dan pumping speed yang digunakan sekitar 24 m³/jam (rotari DUO 20) dan 665 liter/detik (turbo molekuler HiPace® 700 M).

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan penelitian ini dibiayai oleh PSTA melalui DIPA Tahun 2015. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Kepala PSTA, seluruh peneliti dan pembantu peneliti kegiatan ini, sehingga pembuatan dokumen perancangan sistem vakum tinggi perangkat irradiator elektron pulsa dapat terwujud.

DAFTAR PUSTAKA

1. R.Ramaswamy, T. Jin, H.Zhang, *Pulse Electric Field Processing*, Food Science & Technology, The Ohio State University, 2005, <http://fst.osu.edu/pef>

2. U.S. FOOD & DRUG ADMINISTRATION, Center for Food Safty & Applied Nutrition, 2000. *Kinetic of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies High Voltage Arc Discharge*
3. Roth, A., *Vacuum Technology*, North-Holland Publishing Company, New York 1979.
4. ROL, P.K., *Pengantar Teknik Vakum* (diterjemahkan oleh Peter Soedoyo), Gajah Mada University Press, Yogyakarta 1977.
5. Perkins, W.G., *Permeation and Outgassing of Vacuum Materials*, Journal Vacuum Science Technology, Vol. 10, No. 4, American Vacuum Society, USA, 1973.
6. O'hanlon, J.F., *A User's Guide to Vacuum Technology*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
7. Phil Dnielson, a journal of Practical and Useful Vacuum Technology, March 1999.
8. John A. Venables, Lecture notes, Arizona Board of Regents for Arizona State Universit, Latest version 1, March 2005
9. OURLIKON, Leybold Vacuum GmbH, Bonner Strasse 498, D-50968 Cologne.
10. Biltoft, Benapfl, and Swain, *Vacuum Technology 60A & 60B*, 2002.

TANYA JAWAB

Silakhuddin

- Apakah sudah pernah dibuktikan rumus persamaan hitungan tekanan dengan hasil nyata pengukuran?

Bambang Siswanto

- Sudah kita bandingkan dengan kenyataan dan hasilnya memang berbeda, hal tersebut harus dimasukkan koreksi terkait sistem vakum untuk selanjutnya.