

PENGARUH GEOMETRI RUANGAN TERSIRKULASI TERHADAP DISTRIBUSI TEKANAN GAS: KASUS PADA SUMBER ION SIKLOTRON

Silakhuddin¹ dan Fajar Hidayat Budi Santosa²

¹Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN
Jl. Babarsari Sleman Yogyakarta

²FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta
Jl. Colombo No. 1 Yogyakarta, 55281
Email: silakh@batan@go.id

Abstrak

Ruang ionisasi dalam suatu sumber ion merupakan ruang yang di dalamnya bersirkulasi gas yang diionkan, terdiri atas *housing* katoda dan ruang anoda atau kolom plasma. Distribusi tekanan gas hidrogen di sepanjang sumbu ruang anoda telah dipelajari untuk geometri *housing* katoda yang bervariasi baik panjang maupun tingginya. Studi yang dilakukan secara simulasi menggunakan program komputer berbasis CFD dimaksudkan untuk menilai kemungkinan melakukan modifikasi geometri *head* yang sudah dibuat untuk mendapatkan unjuk kerja yang lebih baik. Hasil analisis dari simulasi tersebut menunjukkan bahwa geometri *head* yang sekarang sudah dibuat yaitu dengan panjang *housing* 42 mm dan tinggi 16 mm merupakan geometri yang optimum. Secara umum dapat dikatakan bahwa untuk suatu ruangan yang di dalamnya tersirkulasi gas, bila ukuran aliran masuk dan keluar gas yang kecil dibandingkan ukuran ruangnya, maka perubahan geometri yang simetri dari ruangan tidak mempengaruhi distribusi tekanan gas yang merata di dalam ruangan tersebut.

Kata kunci: ruang tersirkulasi, tekanan gas, CFD, sumber ion

Abstract

Ionization chamber of an ion source is a chamber in which the gas to be ionized is circulated, consisting of cathode housing and the anode chamber or plasma column. Hydrogen gas pressure distribution along the axis of the anode chamber has been studied for geometry variation of the cathode housing both the long and the high. The study is carried out by simulation method using CFD-based computer program intended to assess the possibility of modifying the geometry of the head that was constructed to obtain a better performance. The results of analysis indicate that the geometry of the head that has now been constructed that the length of the housing 42 mm and height 16 mm is the optimum geometry. In general it can be concluded that for a chamber in which the gas circulating inside, when the size of the inflow and outflow of gas are relatively small compared to the size of chamber, the symmetry change of the chamber geometry do not affect significantly on the even distribution of gas pressure in the chamber.

Keywords: circulated chamber, gas pressure, CFD, ion source

PENDAHULUAN

Sumber ion jenis PIG (*Penning Ionization Gauge*) untuk siklotron DECY 13

telah didesain, dikonstruksi dan diuji fungsinya. Desain dasarnya mengacu pada sumber ion yang terpasang pada Siklotron

BATAN Serpong, yang merupakan buatan CTI Berkeley. Dari desain dasar kemudian dilakukan pengembangan menjadi desain inovatif dengan menjadikan *head* nya dapat dilepas-pasang dari tangkainya. Uji coba sumber ion tersebut telah dilakukan dan dihasilkan arus ion H^+ sebesar $15 \mu A$ pada kondisi parameter-parameter pengujian, artinya bukan pada parameter operasi siklotron (Silakhuddin dan Sunarto, 2011). Untuk keperluan pengembangan lebih lanjut, masih diperlukan beberapa informasi mengenai karakteristik dari sumber ion tersebut, salah satunya adalah untuk menjawab pertanyaan apakah geometri *head* sudah cukup optimal dalam pembentukan ion-ion.

Ruang *head* pada sumber ion jenis PIG terdiri atas *housing* katoda (*cathode housing*) dan ruang anoda (*anode chamber*), dan produksi ion-ion atau plasma terjadi pada ruang anoda. Dalam pembentukan ion-ion tersebut, faktor tekanan gas memegang peran yang penting. Tekanan gas yang kurang akan menyebabkan sulit terbentuknya plasma, dan tekanan yang terlampau tinggi akan menimbulkan tegangan dadal yaitu terjadi jatuh tegangan di antara anoda dan katoda di dalam *head* sumber ion. Kondisi yang diinginkan adalah terjadinya plasma di ruang anoda yang disebabkan proses *glow discharge* (lucutan nyala) yang lazimnya terjadi pada

tekanan minimum 10^{-4} Torr dan maksimum pada tekanan 10^{-1} Torr (Rovey, J.L., 2008).

Pada makalah ini disajikan tentang hasil-hasil simulasi dari pengaruh variasi geometri *housing* katoda terhadap distribusi tekanan gas di dalam ruang *head* sumber ion. Karena di dalam ruang anoda dari sumber ion tersebut merupakan tempat terbentuknya plasma, maka pengamatan distribusi tekanan di ruang ini lebih ditekankan. Pengaruh dari laju alir gas terhadap tekanan di ruang anoda juga disimulasikan. Simulasi menggunakan perangkat lunak yang berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Dari hasil-hasil tersebut akan dapat dinilai apakah geometri *head* yang sekarang ini telah dibuat masih diperlukan perubahan untuk optimasi. Manfaat lain dari hasil simulasi adalah dapat ditentukan nilai laju alir gas masuk yang tepat dari sumber ion tersebut di dalam operasi siklotron.

Dalam sumber ion jenis PIG dimana ionisasi terbentuk karena tumbukan elektron, jumlah atom atau molekul yang diionisasi tergantung pada parameter-parameter (Gobel, D.M. et al, (2007):

1. Rapat arus elektron (ampere/m^2), (I_e)
2. Volume efektif ionisasi (V)
3. Jumlah atom/molekul per satuan volume ruang ionisasi (n_a)
4. Tampang lintang ionisasi (σ_i)

Laju pembentukan ion dalam ruang ionisasi:

$$I_i = J_e V n_a \sigma_i \quad (1)$$

Untuk sumber ion jenis PIG, J_e dapat diambil dari rapat arus lucutan elektron antara katoda dan anoda. V adalah bagian volume dimana atom-atom gas terionisasi, yang tidak harus sama dengan volume ruang ionisasi.

Nilai n_a dapat dihitung dari persamaan:

$$n_a = \frac{P}{kT} \quad (2)$$

Dimana P adalah tekanan gas, k tetapan Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K dan T suhu plasma dalam °K.

Dari persamaan (1) dan (2) tersebut terlihat bahwa laju ionisasi dalam sumber ion dipengaruhi oleh tekanan gas di dalam ruang ionisasi atau ruang plasma.

Metode perhitungan untuk menghitung besarnya tekanan gas di dalam ruang *head* secara analitik tidak mudah, bahkan mungkin tidak dapat dilakukan mengingat bentuknya yang tidak sederhana. Oleh karena itu untuk menentukan hubungan antara geometri dari ruang *head* sumber ion dengan tekanan gas digunakan perangkat lunak komputer yang berbasis metode CFD.

CFD dapat didefinisikan menjadi dua kata, yaitu *computational* dan *fluid dynamics*. *Computational* adalah segala sesuatu yang berhubungan dengan matematika dan metode

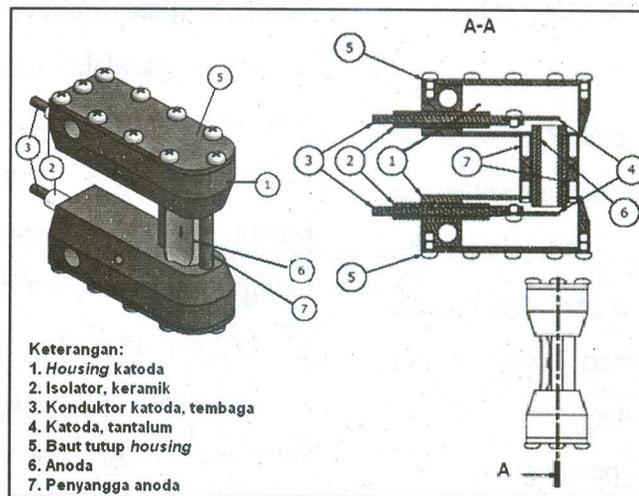
numerik atau komputasi, sedangkan *fluid dynamics* adalah dinamika dari segala sesuatu yang mengalir. Ditinjau dari istilah di atas, CFD bisa berarti suatu teknologi komputasi yang memungkinkan untuk mempelajari dinamika dari benda-benda atau zat-zat yang mengalir.

Secara definisi, CFD adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika). Pada dasarnya, persamaan-persamaan pada fluida dibangun dan dianalisa berdasarkan persamaan diferensial parsial (PDE = *Partial Differential Equation*) yang merepresentasikan hukum-hukum konservasi massa, momentum, dan energi (Tuakia, F., 2008).

METODE PENELITIAN

Komponen *head* adalah komponen inti sumber ion karena disini proses pembentukan ion terjadi, terdiri atas ruang anoda, katoda dan *housing* katoda. Gambar konstruksinya seperti pada Gambar 1.

Ruang *head* terdiri atas *housing* katoda (selanjutnya disebut *housing* saja) dan ruang anoda atau kolom plasma. Lobang gas yang akan dimasukkan terletak pada sisi *housing*. Katoda bertegangan positif 2 kV



Gambar 1. Komponen *Head* Sumber Ion

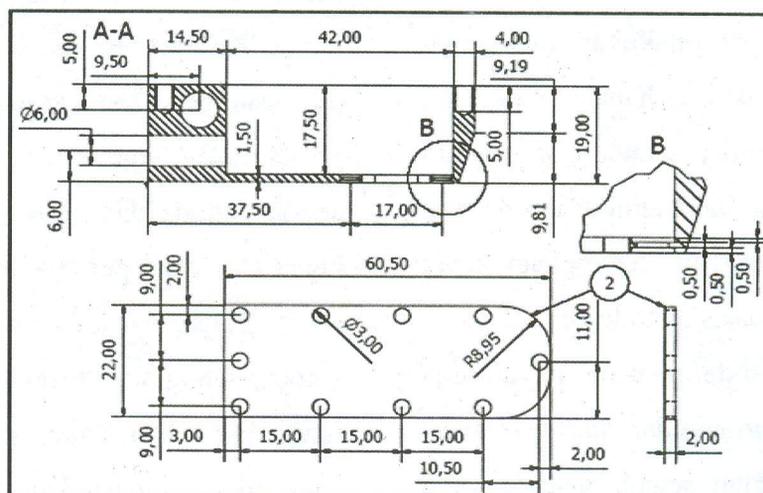
terhadap *housing* dan anoda. Tegangan tersebut menyebabkan lucutan atom-atom gas dan terbentuk plasma pada ruang anoda.

Ukuran detail acuan *housing* dan anoda pada *head* sumber ion ditunjukkan pada Gambar 2 (Silakhuddin, 2010).

Pada gambar bagian atas terlihat ukuran-ukuran dari *housing* adalah:

- Panjang (p) 42 mm
- Tinggi (t) $17,5 \text{ mm} - 1,5 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$, di mana 1,5 mm adalah tebal tutup atas.
- Diameter lubang aliran masuk gas (tidak tampak dalam gambar) adalah 1 mm.

Teknik penentuan pengaruh variasi geometri *housing* pada *head* sumber ion terhadap distribusi tekanan menggunakan



Gambar 2. Geometri Acuan *Housing* pada *Head* Sumber Ion sebagai Geometri Awal

teknik simulasi dengan menggunakan program komputer berbasis metode CFD. Ada 2 program komputer yang digunakan, yaitu program *preprocessor* dan program *solver*.

Program pertama untuk membuat model geometri dan membuat jaring-jaring (mesh) elemen perhitungan, selanjutnya proses perhitungan atau penentuan nilai-nilai fisika fluida digunakan program kedua.

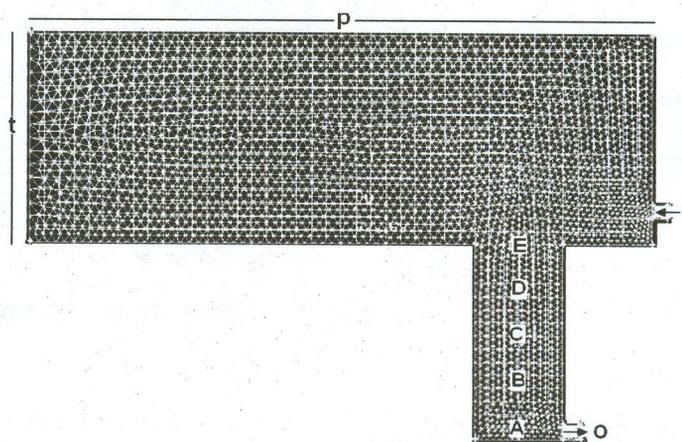
Rongga *head* seperti terlihat pada Gambar 1 dibuatkan terlebih dahulu gambar modelnya menggunakan program *preprocessor*. Karena sifat simetri di antara *housing* atas dan bawah (karena gas dimasukkan dari kedua *housing*), maka pemodelannya cukup diambil setengah bagian. Demikian juga karena sifat simetri azimutal, maka pemodelannya dilakukan dalam Gambar 2 dimensi. Setelah selesai dibuat model kemudian dilakukan *meshing* yaitu dibuat elemen-elemen kecil yang berguna dalam proses

perhitungan. Gambar model dan hasil *meshing* ditunjukkan pada Gambar 3.

Dalam model tersebut, gas dimasukkan melalui lobang I (*inlet*) yang berdiameter 1 mm dan gas keluar melalui lobang O (*outlet*) yang berdiameter 1,2 mm. Untuk geometri acuan mempunyai ukuran $p=42$ mm dan $t=16$ mm.

Dengan program *solver* dihitung distribusi tekanan di sepanjang sumbu rongga anoda berdasar nilai-nilai parameter tetap, yaitu besar aliran gas masuk dan tekanan di aliran keluar. Perhitungan dilakukan dengan memvariasi variabel bebas yaitu geometri *housing*, dengan hasil yang diamati (variabel terkait) adalah tekanan gas pada kolom plasma. Setiap perubahan geometri diulangi lagi prosedur pertama di atas.

Variasi geometri *housing* yang mempengaruhi tekanan gas secara sederhana dapat memperbesar atau memperkecil panjang dan tinggi rongga *housing*. Untuk mem-



Gambar 3. Model Rongga-Rongga *Head* dan *Messing*

perbesar panjang tidak dimungkinkan karena akan menghalangi putaran awal berkas ion. Sebaliknya untuk memperkecil tinggi *housing* tidak dimungkinkan karena akan menjadikan jarak antara katoda yang bertegangan tinggi dengan dinding *housing* menjadi terlalu dekat. Jadi yang dimungkinkan adalah memvariasi panjang menjadi lebih kecil dan memvariasi tinggi *housing* menjadi lebih besar.

Parameter tetap yang diberlakukan dalam simulasi ini adalah:

1. Kecepatan aliran masuk dari gas ($V_{inlet} = 0.105$ m/s)
2. Tekanan vakum di keluaran gas ($P_{output} = 5 \times 10^{-4}$ Pa)
3. Diameter masukan gas 0.001 m
4. Diameter keluaran gas 0.0012 m

Parameter pertama ditentukan berdasarkan simulasi pendahuluan bahwa nilai kecepatan tersebut merupakan nilai minimum terbentuknya plasma di sumber ion yaitu pada kira-kira 10^{-4} Torr. Parameter kedua ditentukan berdasar operasi yang umum pada siklotron pemercepat ion negatif. Parameter ketiga dan keempat adalah berdasar desain acuan yang ada.

Langkah-langkah variasi geometrinya adalah:

1. Dengan tinggi *housing* awal 16 mm, divariasi panjangnya mulai dari panjang acuan sebesar 42 mm diperkecil menjadi

35 cm, 30 cm, 25 cm dan 20 cm. Setiap ukuran panjang dilihat distribusi tekanan di sepanjang sumbu aksial ruang anoda, dengan mengambil 4 titik yaitu titik-titik A, B, C, D dan E seperti tertera pada Gambar 3.

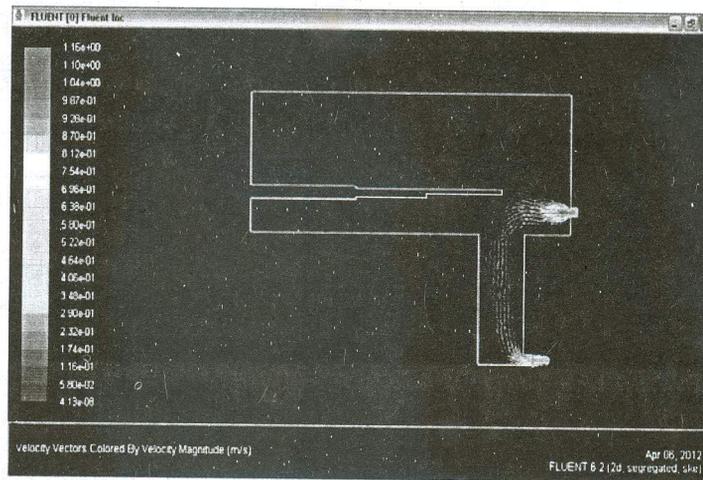
2. Dengan mengambil nilai panjang *housing* yang distribusinya terbaik, nilai tinggi *housing* diperbesar dari nilai acuan 16 mm menjadi berturut-turut 20 mm, 25 mm dan 30 mm. Dalam hal ini juga akan diambil distribusi tekanan yang paling rata.

Variasi dari kecepatan aliran gas masuk juga akan dilakukan untuk mengetahui laju alir yang tepat untuk operasi sumber ion di dalam siklotron.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui bahwa simulasi berproses dengan benar maka terlebih dahulu disimulasikan vektor kecepatan dari aliran gas di dalam *housing* dan ruang anoda, hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.

Dari Gambar 4 terlihat bahwa aliran gas yang masuk mengarah ke ruang anoda dan keluar melalui lobang aliran keluar. Mula-mula konsentrasi aliran kecil dengan kecepatan tinggi kemudian konsentrasinya membesar dengan kecepatan menurun dan kembali konsentrasinya mengecil dengan kecepatan yang naik pada bagian lobang



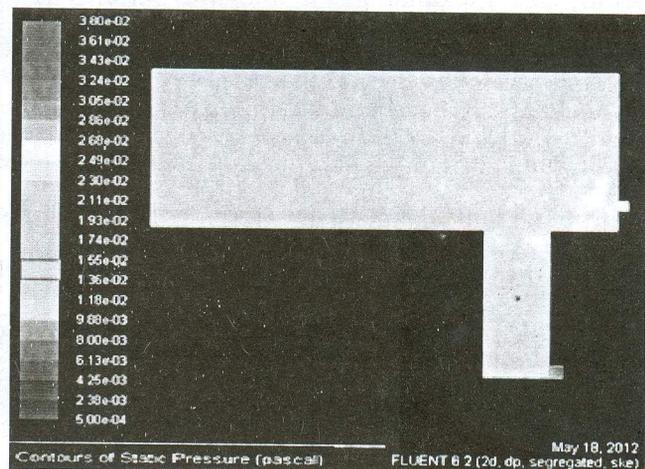
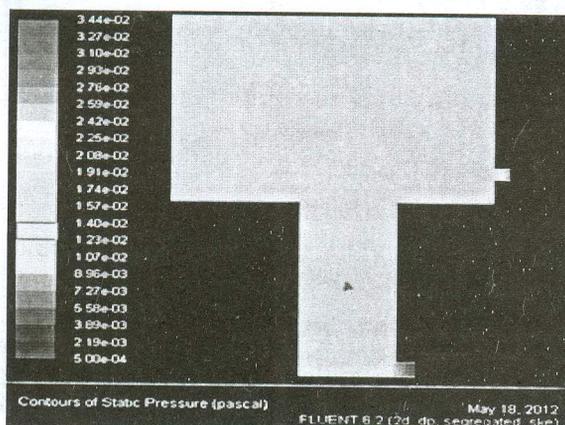
Gambar 4. Hasil Simulasi Vektor Kecepatan Aliran Gas

keluar. Besar kecepatan di *housing* tampak hampir nol. Dengan fenomena seperti itu dapat dikatakan bahwa simulasi berproses dengan benar.

Tidak semua hasil simulasi distribusi tekanan disajikan di sini, hanya hasil-hasil untuk ukuran panjang 20 mm dan 42 mm ditunjukkan pada Gambar 5.

Data-data kuantitatif dari distribusi tekanan sepanjang sumbu ruang anoda

ditunjukkan pada Tabel 1. Dari data-data dalam Tabel 1 tersebut terlihat bahwa pada variasi panjang *housing* antara 20 hingga 40 mm menghasilkan distribusi tekanan gas yang sama di sepanjang sumbu rongga anoda. Dengan kata lain perubahan panjang *housing* tidak berpengaruh pada distribusi yang merata dari tekanan di rongga anoda. Panjang 42 mm memberikan tekanan yang relatif lebih besar dibandingkan panjang



Gambar 5.

Distribusi Tekanan Gas untuk Panjang *Housing* 20 mm (Gambar Kiri) dan Distribusi Tekanan Gas untuk Panjang *Housing* 42 mm (Gambar Kanan)

Tabel 1. Distribusi Tekanan Gas Sepanjang Sumbu Ruang Anoda, dengan Variasi Panjang *Housing*

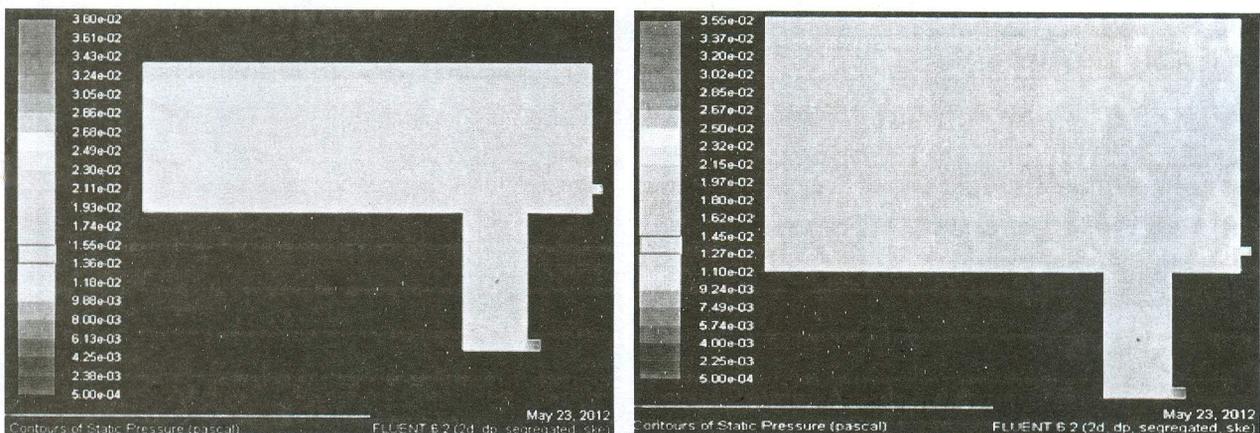
Panjang <i>housing</i> , mm	Tekanan gas (Pa) pada titik-titik:				
	A ($\times 10^{-2}$)	B ($\times 10^{-2}$)	C ($\times 10^{-2}$)	D ($\times 10^{-2}$)	E ($\times 10^{-2}$)
20	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
25	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
30	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
35	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
42	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36

housing yang lebih pendek. Karena tekanan yang lebih besar dari 1×10^{-4} Torr hingga tekanan 1×10^{-1} Torr akan menghasilkan intensitas plasma yang lebih baik dibandingkan tekanan di bawahnya, maka di sini dapat dikatakan bahwa untuk ukuran panjang *housing* 42 mm merupakan ukuran yang tepat untuk desain *head* sekarang ini.

Pengamatan terhadap kelima hasil variasi panjang secara visual dapat dikatakan bahwa distribusi tekanan di *housing* juga cukup merata, kecuali pada ukuran panjang

20 mm, tetapi perbedaan itu kira-kira hanya 50%. Hasil-hasil simulasi untuk ukurantinggi *housing* 16 mm dan 30 mm ditunjukkan pada Gambar 6. Data-data kuantitatif dari distribusi tekanan sepanjang sumbu ruang dari distribusi tekanan sepanjang sumbu ruang anoda ditunjukkan pada Tabel 2.

Dari data-data dalam Tabel 2 tersebut terlihat bahwa pada variasi tinggi *housing* antara 16 hingga 30 mm juga menghasilkan distribusi tekanan gas yang sama di sepanjang sumbu rongga anoda, sebagaimana



Gambar 6. Distribusi Tekanan Gas untuk Tinggi *Housing* 16 mm (Gambar Kiri) dan Distribusi Tekanan Gas untuk Tinggi *Housing* 30 mm (Gambar Kanan)

Tabel 2. Distribusi Tekanan Gas Sepanjang Sumbu Ruang Anoda, dengan Variasi Tinggi *Housing*

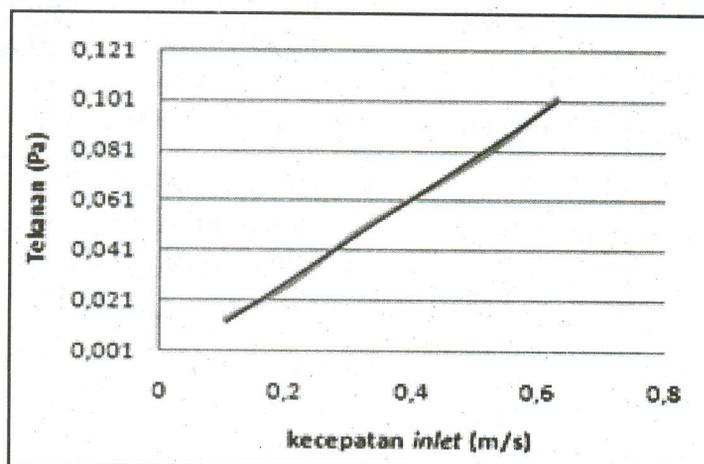
Tinggi <i>housing</i> , mm	Tekanan gas (Pa) pada titik-titik:				
	A ($\times 10^{-2}$)	B ($\times 10^{-2}$)	C ($\times 10^{-2}$)	D ($\times 10^{-2}$)	E ($\times 10^{-2}$)
16	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
20	1,27	1,27	1,27	1,27	1,44
25	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
30	1,27	1,27	1,27	1,27	1,45

diperoleh pada variasi panjang *housing*. Memang pada tinggi 30 mm tekanan pada titik E berbeda dengan titik-titik yang lain, tetapi perbedaan tersebut kira-kira hanya 10%.

Pengamatan terhadap kelima hasil variasi tinggi menghasilkan suatu data secara visual bahwa distribusi tekanan di *housing* juga cukup merata. Hasil ini sama seperti yang diamati pada variasi panjang.

Pengaruh variasi kecepatan *inlet* pada *housing* dengan panjang *housing* 42 mm dan lebar *housing* 16 mm serta tekanan *outlet* 0,0005 Pa terhadap distribusi tekanan di titik ruang anoda atau kolom plasma adalah

seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Besaran-besaran tekanan yang dimasukkan adalah untuk kecepatan antara 0,105 m/s hingga 0,840 m/s, yang bila dikonversi ke besaran laju alir (dengan menggunakan diameter lobang gas masuk 0,01 mm) bersesuaian dengan 5 cc/m hingga 40 cc/m. Semakin besar nilai kecepatan *inlet* yang diberikan pada *housing* maka akan berpengaruh terhadap besarnya tekanan di dalam kolom plasma. Walaupun pada kecepatan 0,510 m/s sudah dihasilkan tekanan kira-kira 1×10^{-2} Pa, yaitu tekanan minimum terbentuknya plasma, tetapi untuk menghasilkan tekanan untuk terbentuknya



Gambar 7.

Pengaruh Tekanan di Kolom Plasma atas Variasi Kecepatan Aliran Gas Masuk

plasma intensitas kuat, yaitu mulai 1×10^{-1} Pa, dimulai pada kecepatan *inlet* mulai 0.630 m/s.

Jika kasus geometri head sumber ion dipakai untuk kasus yang lebih umum yaitu suatu ruangan yang di dalam terdapat sirkulasi gas, maka distribusi di dalam ruangan tekanan gas tetap merata sekalipun dilakukan perubahan geometri ruangnya.

Tetapi hasil ini baru dapat dibuktikan untuk kondisi-kondisi:

1. Perubahan geometri yang simetri, dan Untuk ruangan yang ukuran gas masuk dan keluarnya kecil.
2. Sirkulasi gas hanya dalam ukuran beberapa puluh cc/menit.

KESIMPULAN

Suatu ruang dari *head* sumber ion sebagai pemodelan mini dari suatu ruangan yang di dalamnya terdapat sirkulasi gas, telah diamati pengaruh perubahan geometri ruangnya terhadap distribusi tekanan gas di dalamnya. Dari simulasi yang telah dilakukan pada geometri *housing* katoda dari sumber ion diperoleh data bahwa variasi panjang dan tinggi *housing* tidak berpengaruh secara nyata terhadap distribusi yang merata pada ruang *head* tersebut. Geometri *head* yang sekarang sudah dibuat, yaitu dengan panjang *housing* katoda 42 mm

dan tinggi 16 mm merupakan geometri yang relatif optimum dibandingkan ukuran-ukuran yang lain. Secara umum dapat dikatakan bahwa untuk suatu ruangan yang di dalamnya tersirkulasi gas, bila ukuran aliran masuk dan keluar gas yang kecil dibandingkan ukuran ruangnya maka perubahan geometri yang simetri dari ruangan tidak mempengaruhi distribusi tekanan gas yang di dalam ruangan tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Goebel, D.M., Wirz, R.E., & Katz, I. (2007). "Analytical ion thruster discharge performance model". *Journal of Propulsion and Power*, 23 (5).
- Rovey, J.L. (2008). "Design parameter investigation of a cold cathode penning ion source for general laboratory applications". *Journal of Plasma Science and Technology*, 17(3). DOI.
- Silakhuddin. (2010). Rancang bangun prototipe sumber ion siklotron 13 MeV untuk siklotron produksi radioisotop untuk fasilitas diagnostik kedokteran nuklir PET. *Laporan Program Insentif PI PKPP*. Yogyakarta: PTAPB BATAN.
- _____, dan Sunarto. (2011). "Eksperimen uji pada daya tinggi dari head sumber ion untuk siklotron". *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*. ISSN 1411-1349, 13. Yogyakarta: PTAPB-BATAN.
- Tuakia, F. (2008). *Dasar-dasar CFD menggunakan FLUENT*. Bandung: Informatika.