

# KARAKTERISTIK PARAMETER PLASMA DALAM BEJANA ANODA BERONGGA SISTEM SUMBER ELEKTRON KATODA PLASMA

Agus Purwadi, Sudjatmoko, Bambang Siswanto, Wirjoadi, Lely Susita RM

PTAPB – Badan Tenaga Nuklir Nasional

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb Yogyakarta55281

E-mail : Agus.p@batan.go.id

## ABSTRAK

**KARAKTERISTIK PARAMETER PLASMA DALAM BEJANA ANODA BERONGGA SISTEM SUMBER ELEKTRON KATODA PLASMA.** Telah dilakukan karakterisasi parameter plasma dalam bejana anoda berongga yang dibuat dari SS 304 bentuk silinder dengan jari-jari 2,00 cm dan panjang 48,75 cm. Sistem elektroda sumber elektron di dalam bejana anoda berongga terdiri dari katoda silinder pejal dari bahan magnesium dan anoda bentuk kerucut dari bahan SS 304 sedang diantara katoda-anoda dibatasi isolator bahan teflon berbentuk cincin. Anoda berongga dari bahan SS 304 berlaku sebagai anoda dengan dibatasi silinder isolator dari bahan koprolon terhadap katoda ignitor. Karakterisasi parameter plasma dalam bejana anoda berongga dilakukan pada tekanan vakum sekitar  $10^{-4}$  torr, tegangan keluaran ignitor 12 kV pada sistem IDPS (Ignitor Discharge Power Supply) dan tegangan pemercepat 1 kV ( 800 V) pada sistem ADPS (Anode Discharge Power Supply). Besar arus lucut plasma pada kondisi tersebut dengan menggunakan alat ukur koil Rogowski diperoleh sebesar  $I = 50$  A. Besar harga parameter plasma dalam bejana anoda berongga masing-masing adalah : kerapatan plasma electron  $n_e = (8,166 \times 10^{19})$  cacah/m<sup>3</sup>, suhu plasma electron  $T_e = (3,835 \times 10^4)$  K = 3,306 eV, frekuensi plasma electron  $f_e = 80.820 \times 10^6$  Hz = 80,82 GHz, panjang Debye  $d_D = (30,025 \times 10^{-9})$  m = 30 nm, jarak sheath  $d_s = (522,207 \times 10^{-9})$  m = 522 nm dan rapat arus berkas elektron  $j_e = (27 \times 10^{10})$  A/m<sup>2</sup> =  $(27 \times 10^6)$  A/cm<sup>2</sup>.

Kata-kunci : Plasma, ignitor, lucutan busur, tebal selubung plasma, panjang Debye.

## ABSTRACT

**DETERMINATION OF PLASMA PARAMETERS CHARACTERISTICS IN HOLLOW ANODA TUBE OF PLASMA CATHODE ELECTRON SOURCE SYSTEM.** It has been carried out the plasma parameters characteristics determination in hollow anode tube which is made of SS cylinder shaped with radius of 2.00 cm and length of 48,75 cm. Electron source electrode system in the hollow anode tube consists of massive cylinder cathode made of magnesium and SS anode of cone shaped which is between the cathode and anode separated by teflon isolator of ring shaped. The anode of SS hollow anode is constricted by isolator cylinder made of coprolon to ignitor cathode. The plasma parameters characteristics determination in hollow anode is carried out on vacuum pressure about of  $10^{-4}$  torr, ignitor output voltage of 12 kV on Ignitor Discharge Power Supply (IDPS) system and accelerator voltage of 1 kV ( 800 V) on Anode Discharge Power Supply (ADPS) system. The pulse plasma current in order of 50 amper (A) on that condition is obtained by using Rogowski coil as measurement device. The values of plasma parameters in hollow anode are : the electron plasma density  $n_e = (8,166 \times 10^{19})$  m<sup>-3</sup>, electron plasma temperature  $T_e = (3,835 \times 10^4)$  °K = 3,306 eV, electron plasma frequency  $f_e = 80.820 \times 10^6$  Hz = 80,82 GHz, Debye length  $d_D = (30,025 \times 10^{-9})$  m = 30 nm, sheath thickness  $d_s = (522,207 \times 10^{-9})$  m = 522 nm and the electron beam current density  $j_e = (27 \times 10^{10})$  A/m<sup>2</sup> =  $(27 \times 10^6)$  A/cm<sup>2</sup> respectively.

Keywords : Plasma, igniter, arc discharge, sheath thickness, Debye length.

## PENDAHULUAN

Rancang-bangun Sumber Elektron Katode Plasma (SEKP) merupakan salah satu program institusi PTAPB-BATAN pada Bidang Teknologi Akselerator dan Fisika Nuklir (BTA FN). SEKP

merupakan suatu pembangkit berkas elektron yang mana berkas elektron dibentuk oleh adanya emisi atau ekstraksi elektron dari permukaan plasma. SEKP dengan keluaran berkas elektron berpenampang luas dan berarus besar akan sangat bermanfaat untuk aplikasi perlakuan permukaan bahan/karet alam

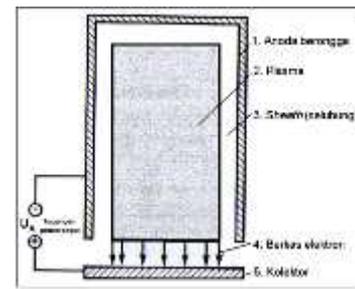
yang berpenampang lebar<sup>[1]</sup>. Apabila dibandingkan dengan mesin berkas elektron yang beroperasi secara kontinyu, maka rancang bangun sistem SEKP adalah lebih sederhana karena SEKP tidak menggunakan tabung akselerator, sistem pemfokus dan juga magnet pembelok. Demikian pula untuk produk-produk berkas yang semacam, SEKP mempunyai keuntungan ekstra atas sistem katoda panas, yang mana akan jauh lebih mudah untuk membentuk kehomogenan luasan daerah emisi plasma. SEKP selain beroperasi dalam bentuk pulsa (orde nano hingga milli sekon) juga mampu menghasilkan kerapatan arus tinggi.

Sistem SEKP Program BTA FN adalah tipe DUET yang mana di dalam bejana anoda berongganya terdapat 2 (dua) sistem elektroda sumber elektron sebagai pemicu terbentuknya plasma di dalam bejana tersebut. Plasma dapat terbentuk setelah adanya spot plasma di permukaan katode magnesium pada modul/sistem elektroda pemicu dan baru dilanjutkan lucutan plasma akibat beda potensial antara katoda (sistem elektroda) dengan anoda (bejana anoda berongga)<sup>[2]</sup>. Timbulnya spot plasma tersebut dipasok oleh adanya sumber daya *discharge ignitor* (*Ignitor Discharge Power Supply/IDPS*) orde puluhan kV, sedang terjadinya plasma dipasok oleh adanya sumber daya *discharge* anoda (*Anode Discharge Power Supply/ADPS*). Dalam bejana anoda berongga, elektron pada plasma permukaan ditarik menuju ke dinding anoda oleh tegangan anoda dengan menempuh jarak sejauh tebal *sheath* (selubung plasma), selanjutnya arus berkas elektron dipercepat menggunakan tegangan pemercepat eksternal orde ratusan kilo-volt (kV) menuju target melalui jendela bejana vakum terluar<sup>[2]</sup>.

Unit SEKP pada tahun 2013 ini telah berhasil dirancang-bangun modul-modul komponen sistemnya, diantaranya komponen anoda berongga penghasil plasma yang akan dibahas dalam tulisan ini, khususnya dalam penentuan karakter parameter plasma yang terjadi di dalam bejana anoda berongga tersebut. Dengan bantuan alat ukur koil Rogowski (untuk mengukur arus berkas plasma elektron pulsa) dan probe pembagi tegangan (untuk mengukur tegangan tinggi pulsa) yang semuanya dibuat sendiri serta dengan bantuan alat osiloskop. Sasaran kegiatan penelitian ini dapat ditentukan parameter plasma dalam bejana anoda berongga, yaitu kerapatan elektron plasma, suhu elektron plasma, frekuensi elektron plasma, panjang Debye plasma, tebal/panjang *sheath* dan rapat arus berkas electron.

## METODA DAN TATA KERJA

Skema bejana anoda berongga penghasil plasma ditunjukkan pada Gambar 1<sup>[3]</sup>. Dapat dilihat pada Gambar 1 bahwa plasma (2) yang terbentuk di

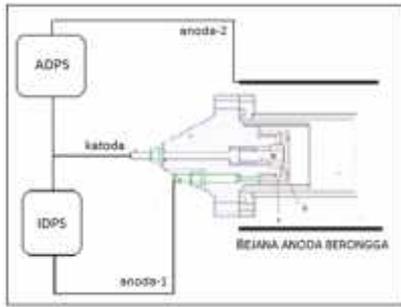


**Gambar 1. Skema bejana anoda berongga penghasil plasma**

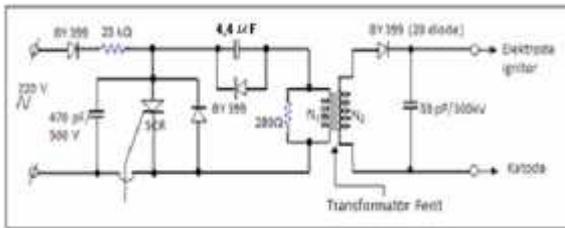
dalam anoda berongga (1), pada permukaan plasma, elektronnya akan ditarik oleh tegangan pemercepat ( $U_A$ ) dari ADPS. Arus berkas elektron (4) atas pengaruh ADPS tersebut akan bergerak dari permukaan plasma sampai dengan permukaan anoda berongga (5) yakni bergerak sepanjang *sheath*/selubung plasma (3).

Karakterisasi parameter plasma dalam bejana anoda berongga dapat dilakukan setelah dipenuhi syarat untuk masing-masing modul/komponen pada sistem SEKP serta alat-alat ukur parameter plasmanya dapat bekerja dengan optimum, diantaranya modul elektroda pemicu, sistem vakum, sumber daya ignitor, sumber daya lucutan busur plasma, alat ukur tegangan (probe pembagi tegangan), alat ukur arus pulsa (koil Rogowski) serta Osiloskop. Pembentukan spot plasma dilakukan dengan menggunakan unit sistem elektroda ignitor dalam bejana anoda berongga penghasil plasma. Bejana anoda berongga dibuat dari bahan stainless steel (SS) 304 setebal 3 mm, bentuk silinder dengan jari-jari 2,00 cm dan panjang 48,75 cm. Pelucutan sistem elektroda sumber elektron dilakukan pada kondisi tekanan vakum sekitar  $10^{-4}$  torr, menggunakan IDPS yang kutub negatifnya dihubungkan dengan katoda dan kutub positifnya dihubungkan dengan anoda pada sistem elektroda. Pelucutan berikutnya adalah lucutan busur plasma yaitu pembentukan plasma di dalam bejana anoda berongga. Lucutan busur plasma muncul setelah pembentukan spot, selanjutnya spot ini menginisiasi pembentukan lucutan plasma di bejana anoda berongga, yang muncul akibat adanya beda potensial antara katoda (sistem elektroda) dengan anoda (bejana anoda berongga) pada sistem ADPS. Pada Gambar 2 ditunjukkan skema percobaan pembentukan lucutan busur plasma pada bejana anoda berongga<sup>[4]</sup>. Terlihat pada Gambar 2 bahwa kutub negatif dari ADPS terhubung bersama dengan katoda IDPS, kutub positifnya dihubungkan dengan bejana anoda berongga (anoda-2).

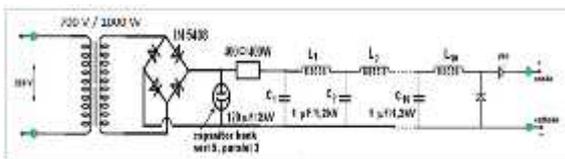
Pada Gambar 3 ditunjukkan rangkaian elektronik sistem IDPS dan pada Gambar 4 ditunjukkan rangkaian elektronik sistem ADPS yang digunakan dalam percobaan penentuan parameter plasma di dalam bejana anoda berongga.



Gambar 2. Skema pembentukan lucutan busur plasma pada bejana anoda berongga



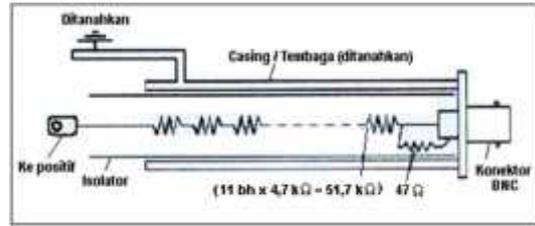
Gambar 3. Rangkaian elektronik sistem IDPS



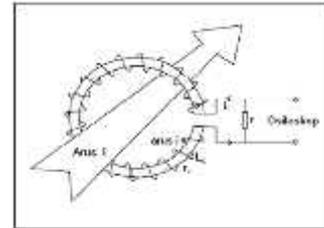
Gambar 4. Rangkaian elektronik sistem ADPS

Pengukuran tegangan tinggi dapat digunakan probe pembagi tegangan. Pada Gambar 5 ditunjukkan bahwa probe pembagi tegangan yang merupakan pengukur tegangan tinggi antara kutub positif dengan grounded (ditanahkan), yang mana hasil ukur dapat diperlemah 1100 kali yakni dengan cara tahanan sebesar 4,7 k sebanyak 11 buah (total 51,7 k ) disusun secara seri dengan tahanan depan sebesar 47 .

Arus lucut berkas plasma dalam bejana anoda berongga dapat ditentukan dengan menggunakan alat bantu koil Rogowski dan Osiloskop. Pada Gambar 6 ditunjukkan skema alat ukur parameter plasma koil Rogowski untuk mengukur besar arus berkas elektron pulsa. Koil Rogowski merupakan solenoid dengan jumlah lilitan tertentu yang dibengkokkan sehingga menjadi berbentuk torus, sedang arus berkas pulsa yang akan diukur adalah yang mengalir melalui bagian dalam torusnya<sup>[5]</sup>. Pada Gambar 6 ditunjukkan bahwa koil Rogowski mempunyai resistansi koil  $r_c$ , induktansi koil  $L_c$  dan aliran arus induksi  $i$  serta dibagian ujungnya dipasang resistansi  $r$  yang berinduktansi sangat rendah.



Gambar 5. Skema probe pembagi tegangan



Gambar 6. Skema koil Rogowski

Besar tegangan terinduksi yang lewat terminal koil dapat dituliskan sebagai:

$$V(t) = \frac{\sim_0 A n}{2f a} \frac{dI}{dt} \tag{1}$$

dimana  $V(t)$  = besar tegangan lucut plasma (V),  $\mu =$  tetapan permeabilitas =  $\mu_0 \times \mu_r$  ( $Hm^{-1}$ ),  $A =$  luas tampang lintang minor torus ( $m^2$ ),  $n =$  jumlah lilitan torus (lilitan),  $a =$  jejari mayor torus (m) dan  $dI/dt =$  perubahan arus lucut plasma perdetik.

Terlihat pada Pers. (1) bahwa tegangan terinduksi sebanding terhadap kecepatan perubahan arus dan bukan arusnya itu sendiri. Agar diperoleh  $I(t)$ , tegangan keluaran koil harus diintegrasikan dan secara percobaan hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan integrator pasif. Dalam praktek, keluaran koil dapat diintegrasikan dengan integrator RC pasif sederhana. Dengan kondisi  $R \gg R_c$  dan  $R \gg L_c$  (dimana frekuensi tertinggi dalam bentuk gelombang), dan kalau harga RC dipilih sedemikian sehingga harganya jauh lebih besar dari pada waktu kejadian plasma t, maka akhirnya dapat diperoleh persamaan arus lucut plasma dalam bentuk<sup>[6]</sup> :

$$I(t) = \frac{2f a R C}{\sim_0 A n} V_0(t) \tag{2}$$

dengan  $I(t)$  = besar arus lucut plasma (amper/A),  $R =$  resistansi integrator ( ),  $C =$  kapasitan integrator (F),  $V_0(t) =$  tegangan terukur (volt),

Pada Pers. (2) karena masing-masing besar harga tetapan dan besaran fisis dapat diketahui/diukur maka besar arus lucut  $I(t)$  pada arus lucut spot (sistim IDPS) dan arus lucut plasma pada bejana anoda berongga (sistim ADPS) dapat

ditentukan. Demikian pula tegangan lucut pada sistem IDPS dan sistem ADPS dengan menggunakan probe pembagi tegangan juga dapat diukur (tegangan yang terbaca pada Osiloskop dikalikan dengan faktor 1100). Kalau besar arus lucut plasma I telah ditentukan, dan jari-jari berkas arus tersebut diketahui sebesar r maka rapat arus plasma  $J_r$  dapat ditentukan menurut persamaan :

$$J_r = \frac{I}{f r^2} \quad (3)$$

Kalau besar arus lucut plasma optimum I telah diperoleh dengan lebar pulsa yang telah tertentu (terbaca pada Osiloskop) maka besar muatan Q yang merupakan kelipatan dari arus dan waktu (lebar pulsa) dapat ditentukan menurut rumus :

$$Q = I \uparrow \quad (4)$$

Mengingat muatan 1 (satu) Coulomb untuk partikel elektron adalah sebanyak  $6,256 \times 10^{18}$  cacah/partikel, maka kalau ukuran bejana anoda berongganya diketahui (dengan r = jari-jari bejana anoda dan l adalah panjang bejana anoda), selanjutnya kerapatan partikel elektron  $n_e$  dalam bejana tersebut juga dapat dihitung menggunakan rumus :

$$n_e = \frac{(6,256 \times 10^{18}) Q}{f r^2 l} \quad (5)$$

Rapat arus lucut plasma dalam bejana anoda berongga, selain dinyatakan dalam bentuk Pers. (3) juga dapat dinyatakan sebagai<sup>[21]</sup> :

$$J_r = \frac{1}{4} e n_e \sqrt{\frac{8kT}{f m_e}} \quad (6)$$

dengan  $e$  = muatan elektron =  $1,602 \times 10^{-19}$  C,  $n_e$  = kerapatan plasma,  $k$  = tetapan Boltzmann =  $1,381 \times 10^{23}$  J/K,  $T$  = suhu plasma,  $m_e$  = massa elektron =  $9,109 \times 10^{-31}$  kg. Dari Pers. (6) suhu elektron plasma T dapat dinyatakan sebagai :

$$T = \frac{16f m_e J_r^2}{8e^2 n_e^2 k} \quad (7)$$

Plasma mempunyai banyak ragam osilasi, salah satu yang terpenting adalah frekuensi plasma elektron. Frekuensi plasma elektron dinotasikan dengan simbol  $f_{pe}$  yang dirumuskan sebagai :

$$f_{pe} = \frac{e^2 n_e}{V_0 m_e} \quad (8)$$

dengan  $V_0$  = tetapan permeabilitas =  $8,85 \times 10^{-12}$  As/Vm.

Ion juga dapat berisolasi pada frekuensi alamnya sendiri sebagai gelombang akustik ion, frekuensi ini dinamakan frekuensi plasma ion, dinotasikan dengan simbol  $f_{pi}$  dengan :

$$f_{pi} = \frac{Q^2 e^2 n_i}{V_0 m_i} \quad (9)$$

dengan  $Q$  = muatan ion total dan  $m_i$  = massa ion.

Kedua Pers. (8) dan (9) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan yang lebih sederhana:

$$f_{pe} = 8980 \sqrt{n_e} \quad (10)$$

$$f_{pi} = 210 Q \sqrt{\frac{n_i}{A}} \quad (11)$$

dengan  $f_{pe}$  dan  $f_{pi}$  dalam satuan Hz,  $n_e$  (kerapatan plasma elektron) dan  $n_i$  (kerapatan plasma ion) dalam satuan  $\text{cm}^{-3}$  dan A (massa ion) dalam satuan amu.

Tebal *sheath*  $d_s$  oleh Peter Debye telah dikarakterisasi panjang skalanya yang selanjutnya dinamakan panjang Debye  $D$  yang rumusnya seperti dinyatakan pada Pers. (12), sedang yang dimaksudkan dengan tebal *sheath* (selubung plasma) atau jarak *shielding* yang merupakan jarak antara permukaan plasma sampai dengan permukaan anoda berongga (bagian dalam) dinyatakan pada Pers. (13) sebagai berikut :

$$\lambda_D^2 = \frac{V_0 k T_e}{e^2 n_e} \quad \text{atau} \quad \lambda_D = 743 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (12)$$

$$d_s = \lambda_D \sqrt{\frac{eV}{k T_e}} \quad (13)$$

dengan  $\lambda_D$  = panjang Debye,  $e$  = muatan elektron =  $(1,602 \times 10^{-19})$  C,  $V$  = besar tegangan yang dipakai,  $k$  = tetapan Boltzmann =  $(1,381 \times 10^{23})$  J/K dan  $T_e$  = suhu plasma elektron.

Untuk jangka waktu  $t$   $t_d$  ( $t_d$  adalah lama waktu yang diperlukan elektron untuk menempuh jarak celah sepanjang d) elektron dipancarkan dari batas plasma yang lolos dari bejana anoda berongga dan dipercepat maju ke anoda bejana vakum oleh medan listrik eksternal. Sedang sebelum berkas elektron lolos dari anoda berongga, berkas tersebut dari permukaan plasma sampai dengan anoda berongga telah menempuh jarak sejauh tebal *sheath* (selubung plasma)  $d_s$ . Rapat berkas arus elektron ( $J_e$ )

dalam bejana anoda berongga sepanjang jarak/setebal selubung plasma  $d_s$  dapat dirumuskan sebagai :

$$j_e = \frac{4V_0}{9} \left( \frac{2e}{m} \right)^{1/2} \frac{U_{acc}^{3/2}}{d_s^2} \quad (14)$$

dengan  $U_{acc}$  = tegangan pemercepat pada anoda berongga.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi parameter plasma dalam bejana anoda berongga dilakukan dengan melibatkan penggunaan modul/komponen IDPS, ADPS, sistem vakum dan sistem deteksi besaran fisis plasma menjadi satu unit peralatan uji coba sistem SEKP, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Bejana anoda berongga (pada Gambar 7 tidak tampak) berada di dalam bejana vakum SEKP, dibuat dari bahan SS 304



Gambar 7. Unit peralatan uji coba sistem SEKP

bentuk silinder dengan jari-jari 2,00 cm dan panjang 48,75 cm. Di dalam bejana anoda berongga diujung-ujungnya terdapat sistem elektroda ignitor yang terdiri dari katoda bentuk silinder pejal dari bahan magnesium dan anoda bentuk kerucut dari bahan SS 304 serta diantara katode dan anode dibatasi dengan cincin dari bahan teflon. Bejana anoda berongga berlaku sebagai anoda dengan dibatasi silinder isolator dari bahan kopolon terhadap katoda ignitor. Karakterisasi parameter plasma dilakukan pada tekanan vakum sekitar  $10^{-4}$  torr, untuk tegangan keluaran ignitor 12 kV (IDPS) dan sumber daya anoda berongga (generator plasma) dengan tegangan keluaran 1 kV (800 V).

Dengan menggunakan spesifikasi bahan/komponen elektronik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, diperoleh hasil pengujian sistem IDPS dengan  $V_{terukur} = 0,5$  volt dan lebar pulsa 5  $\mu$ s. Selanjutnya dengan menggunakan Pers. (2) dengan harga-harga  $a$  = jejari mayor torus =  $10,56 \times 10^{-3}$  m,  $R$  = resistansi integrator = 100  $\Omega$ ,  $C$  = kapasitan integrator =  $0,33 \times 10^{-6}$  F,  $V_0(t)$  = tegangan terukur = 0,5 volt,  $\mu$  = tetapan permeabilitas =  $\mu_0 \times \mu_r = 93 (4 \pi$

$\times 10^{-7})$  Hm<sup>-1</sup>,  $A$  = luas tampang lintang minor torus =  $75,68 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup> dan  $n$  = jumlah lilitan torus = 80 lilitan, telah diperoleh arus  $I_{IDPS} = 1,55$  A.

Dengan menggunakan spesifikasi bahan/komponen elektronik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, diperoleh hasil pengujian sistem ADPS dengan  $V_{terukur} = 2,4$  volt dan lebar pulsa 160  $\mu$ s. Selanjutnya dengan menggunakan Pers. (2) dengan harga-harga  $a$  = jejari mayor torus =  $10,56 \times 10^{-3}$  m,  $R$  = resistansi integrator = 100  $\Omega$ ,  $C$  = kapasitan integrator =  $2,2 \times 10^{-6}$  F,  $V_0(t)$  = tegangan terukur = 2,4 volt,  $\mu$  = tetapan permeabilitas =  $\mu_0 \times \mu_r = (4 \pi \times 10^{-7}) (93)$  Hm<sup>-1</sup>,  $A$  = luas tampang lintang minor torus =  $75,68 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup> dan  $n$  = jumlah lilitan torus = 80 lilitan, telah diperoleh arus  $I_{ADPS} = 49,5$  50 A. Pada Gambar 8 ditunjukkan hasil pulsa tegangan lucut elektroda katoda-anoda (bejana anoda berongga) pada percobaan sistem ADPS.

Secara perhitungan/simulasi telah dipilih besar jari-jari arus berkas yang optimum sebesar  $r = 2,00$  mm dan kalau arus lucut plasmanya  $I_{opt.} = 50$  A,



Gambar 8. Pulsa tegangan lucut pada sistem ADPS

maka kalau besaran  $r$  dan  $I$  ini disubstitusikan pada Pers. (3) akan diperoleh besar rapat arus plasma  $J_{(r:2mm)} = 3,981 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>. Besaran fisis ini sudah sesuai dengan yang diharapkan, karena menurut literatur besar harga rapat arus plasma spot pada sistem SEKP adalah  $j_s = (10^6 - 10^8)$  A/cm<sup>2</sup>.

Secara perhitungan/simulasi telah dipilih besar jari-jari arus berkas yang optimum sebesar  $r = 2,00$  mm dan kalau arus lucut plasmanya  $I_{optimum} = 50$  A, maka kalau besaran  $r$  dan  $I$  ini disubstitusikan pada Pers. (3) akan diperoleh besar rapat arus plasma  $J_{(r:2mm)} = 3,981 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>. Besaran fisis ini sudah sesuai dengan yang diharapkan, karena menurut literatur besar harga rapat arus plasma spot pada sistem SEKP adalah  $j_s = (10^6 - 10^8)$  A/cm<sup>2</sup>.

Demikian pula kalau harga  $I = 50$  A dan besar lebar pulsa = 160  $\mu$ s disubstitusikan pada Pers. (4) akan diperoleh besar jumlah muatan  $Q = (8 \times 10^{-3})$  C.

Diketahui bahwa ukuran bejana anoda berongga adalah dengan jari-jari  $r = 2,00$  cm dan panjang  $l = 48,75$  cm, serta jumlah muatan  $Q = (8 \times 10^{-3})$  C, maka kalau besaran  $r$ ,  $I$  dan  $Q$  tersebut

disubstitusikan pada Pers. (5) akan diperoleh besar kerapatan plasma elektron dalam bejana anoda berongga sebesar  $n_e = (8,166 \times 10^{19})$  cacah/m<sup>3</sup>. Besaran kerapatan ini masih sepuluh kali lebih besar dari yang diharapkan, karena menurut literatur besar harga kerapatan plasma elektron pada sistem SEKP adalah  $n_e = (10^{15} - 10^{18})$  m<sup>-3</sup>. Hal ini bisa terjadi karena derajat kevakuman yang digunakan masih agak rendah (derajat kevakuman belum sampai mencapai 10<sup>-4</sup> torr).

Dengan menggunakan Pers. (7) selanjutnya suhu elektron  $T_e$  dapat ditentukan karena besar harga kerapatan arus plasma  $J_{(r:2mm)} = (3,981 \times 10^6)$  A/m<sup>2</sup> serta kerapatan plasma elektron  $n_e = (8,166 \times 10^{19})$  cacah/m<sup>3</sup> sudah ditentukan, sedang besaran lain cuma merupakan konstanta biasa yang telah tertentu harganya. Telah dihitung dan diperoleh besar suhu plasma elektron tersebut sebesar  $T_e = (3,835 \times 10^4)$  K = 3,306 eV. Besaran suhu ini telah sesuai dengan yang diharapkan, karena menurut literatur besar harga suhu plasma elektron pada sistem SEKP adalah  $T_e = (1 - 10)$  eV.

Untuk frekuensi plasma ion  $f_i$  disini tidak bisa ditentukan karena besar muatan ion total  $Q$  dan kerapatan plasma ion  $n_i$  di dalam tabung anoda berongga belum ditentukan, sedang frekuensi plasma elektron  $f_e$  dapat ditentukan karena menurut Pers. (10) harga besaran tersebut cuma bergantung pada besar harga kerapatan elektron  $n_e$  (dalam satuan cm<sup>-3</sup>) yang mana sudah ditentukan, dan dari hasil perhitungan telah diperoleh harga frekuensi plasma elektron  $f_e = 80,820 \times 10^6$  Hz = 80,82 GHz. Besaran frekuensi ini telah sesuai dengan yang diharapkan, karena menurut literatur besar harga frekuensi plasma elektron pada sistem SEKP adalah  $f_e$  dalam orde pita gelombang-mikro (orde Giga Hertz/GHz),

Selanjutnya karena harga suhu plasma elektron  $T_e$  dan kerapatan plasma elektron  $n_e$  sudah ditentukan maka dengan mensubstitusikan kedua besaran tersebut pada Pers. (12) dapat diperoleh panjang Debye sebesar  $D = (30,025 \times 10^{-9})$  m = 30 nm.

Jarak selubung plasma/tebal *sheath*  $d_s$  yang merupakan jarak antara permukaan plasma sampai dengan permukaan bagian dalam dari bejana anoda berongga dapat diperoleh dari Pers. (13) yakni dengan mensubstitusikan besaran  $D = (30,025 \times 10^{-9})$  m,  $e = (1,602 \times 10^{-19})$  C, V (tegangan terpakai) = 1000 volt,  $k = (1,381 \times 10^{23})$  J/K dan  $T_e = (3,835 \times 10^4)$  K, yang akhirnya diperoleh harga  $d_s = (522,207 \times 10^{-9})$  m = 522 nm.

Besar harga rapat berkas arus elektron ( $j_e$ ) dalam bejana anoda berongga sepanjang/setebal *sheath*  $d_s$  dapat ditentukan dari Pers. (14) yakni dengan mensubstitusikan  $U_{acc} = 1000$  volt,  $d_s = (522,207 \times 10^{-9})$  m dan besaran konstanta lainnya dan telah diperoleh harga rapat berkas arus elektron  $j_e =$

$(27 \times 10^{10})$  A/m<sup>2</sup> =  $(27 \times 10^6)$  A/cm<sup>2</sup>. Besaran rapat berkas arus elektron ini telah sesuai dengan yang diharapkan, karena menurut literatur besar harga rapat berkas arus elektron pada sistem SEKP adalah  $j_e = (10^6 - 10^7)$  A/m<sup>2</sup>.

## KESIMPULAN

Dalam bejana anoda berongga dari bahan SS 304 bentuk silinder (ukuran jari-jari 2,00 cm dan panjang 48,75 cm), bertekanan sekitar 10<sup>-4</sup> torr, tegangan keluaran ignitor 12 kV pada sistem IDPS dan tegangan pemercepat 1 kV pada sistem ADPS, telah diperoleh besar arus lucut plasma optimum sebesar I 50 A. Atas dasar kejadian plasma lucut di dalam bejana anoda berongga tersebut, dengan menggunakan rumus yang terkait telah diperoleh besar harga parameter plasma sebagai berikut:

- Kerapatan plasma elektron  $n_e = (8,166 \times 10^{19})$  cacah/m<sup>3</sup>.
- Suhu plasma elektron  $T_e = (3,835 \times 10^4)$  K = 3,306 eV.
- Frekuensi plasma elektron  $f_e = 80,820 \times 10^6$  Hz = 80,82 GHz
- Panjang Debye  $D = (30,025 \times 10^{-9})$  m = 30 nm.
- Jarak selubung plasma / tebal *sheath*  $d_s = (522,207 \times 10^{-9})$  m = 522 nm.
- Rapat arus berkas elektron  $j_e = (27 \times 10^{10})$  A/m<sup>2</sup> =  $(27 \times 10^6)$  A/cm<sup>2</sup>.

Semua harga parameter plasma (dan rapat arus berkas elektron) yang diperoleh di atas, telah sesuai dengan yang diharapkan karena harga parameter tersebut telah sesuai dengan harga parameter yang terjadi pada sistem SEKP.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyadari bahwa tanpa adanya kerja sama (koordinasi dan eksperimen rutin) yang telah dilakukan oleh semua anggota peneliti dan teknisi di Tim SEKP, tulisan ini tidak bakal terwujud. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih, khususnya kepada Bapak-bapak : Drs. Widdi Usada, Drs. Aminus Salam, Drs. Budi Santosa, MT, Saefurrochman, ST, Ihwanul Azis, AMd, Heri Sudarmanto, Untung Margono serta beberapa staf di Bengkel PTAPB atas segala bantuannya sehingga penentuan/karakteristik parameter plasma selama eksperimen/ ujicoba sistem IDPS dan ADPS pada alat SEKP ini dapat terlaksana dengan baik sekali. Semoga amal baik Bapak-bapak mendapatkan balasan berlipat dari Tuhan Allah SWT.

## DAFTAR PUSTAKA

- Purwadi R, (2006) Application of Plasma-Cathode Electron Beam for Large Area Treatment of Natural Rubber, Nagata Seiki, Ltd.

2. Efim Oks, (2011) Lecture 8 Introduction of Plasma Cathode Electron Source, Presented in BATAN Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia.
3. Efim Oks, (2006) Translated from the Russian by Tatiana Cherkashina and Anna Korovina, Plasma Cathode Electron Source. Physics, Technology, Applications, Institute of High Current Electronics (IHCE), Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademichisky Ave, 634055 Tomsk, Russia.
4. W. Usada et al., (2008) Concept of Electron Source Based on Pulsed Plasma Discharge, presented in IWPCA 2008, INTIMAL-UM, Kuala Lumpur, Malaysia, 14-15 July 2008.
5. Huddleston, RH. and Leonard, SN., (1995) Plasma Diagnostic Techniques, p. 113 – 117, Academic Press, New York.
6. Agus Purwadi, Widdi Usada, (2010) Rancang Bangun Spark Gap Saklar Sumber Elektron Berbasis Plasma dan Metoda Penentuan Besar Arus Berkas Pulsanya, Prosiding PPI Litdas Iptek Nuklir, PTAPB-BATAN Yogyakarta.

---

## TANYA JAWAB

### Tri Mardji Atmono

- Mengapa hanya digunakan derajat kevakuman  $10^{-4}$  Torr, apa tidak bisa lebih rendah lagi ?

- Bagaimana kalau terjadi korosi pada elektroda SS, apa pengaruhnya terhadap parameter plasma yang diukur ?

### Agus Purwadi

- *Ya memang karena menurut hukum Paschen  $V=f(p.d)$ , sedang disini  $V= 10$  kV dan  $d= 1$  mm (sudah tertentu). Tekanan lebih rendah lagi boleh asal  $V$  dan  $d$  sudah tertentu*
- *Pengaruhnya tidak timbul plasma (tidak ada lucutan anoda-katoda)*

### Yunanto

- Mengapa katoda silinder pejal dari magnesium ? Tidak dibuat sama dengan anoda dari SS 304.

### Agus Purwadi

- *Parameter dari spot plasma di katoda adalah laju erosi ion, yang tergantung jenis material katoda dan umumnya lebih besar untuk unsur dengan energi kohesif rendah. Dipakainya magnesium karena unsur ini mempunyai laju erosi ion paling rendah ( $11,7 \mu\text{g/C}$ ) sehingga tidak mudah rusak atau tererosi, serta mempunyai energi kohesif yang juga rendah (pada energi  $1,51$  eV telah terbentuk plasma)*