

# Penentuan Parameter Elektron Plasma Bejana Emiter Berbasis Besar Arus Lucut Busur Gas Udara

(masuk/received 2 Juni 2020, diterima/accepted 7 Juli 2020)

## *Determination of Plasma Electron Parameters of Emitter Vessel Based on Arc Discharge Current Value of Air Gas Pressure*

**Agus Purwadi, Suprpto, Ihwanul Aziz, Saefurrochman**

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Jl. Babarsari, Yogyakarta 55598, Indonesia  
agus.p@batan.go.id

<https://doi.org/10.35895/rf.v4i1.173>

**Abstrak** – Telah dilakukan penentuan parameter elektron plasma dalam Bejana Emiter (BE) berbasis besar arus lucut busur gas udara pada tegangan 10 kV untuk Ignitor Discharge Power Supply (IDPS) dan tegangan anoda 1 kV untuk Arc Discharge Power Supply (ADPS). Tekanan gas udara divariasi mulai dari  $5,70 \times 10^{-3}$  Torr hingga  $7,90 \times 10^{-3}$  Torr. BE terbuat dari Stainless Steel-304 (SS-304) silinder berdiameter  $\phi = 4,00$  cm dan panjang  $l = 66$  cm, dipasang grid berukuran  $60$  cm  $\times$   $2,6$  cm dan ditutup dengan frame yang terdiri dari 15 grup lubang (masing-masing berisi 10 lubang kecil berdiameter  $\phi = 0,4$  cm). Dari hasil eksperimen pada tekanan gas udara sekitar  $6,8 \times 10^{-3}$  Torr diperoleh arus berkas elektron pulsa terekstraksi sebesar 4,17 A pada tegangan tinggi ekstraksi 5 kV. Berdasarkan arus elektron terekstraksi tersebut, diperoleh kerapatan elektron plasma  $n_e$  sebesar  $3,15 \times 10^{12}$  partikel/cm<sup>3</sup> dan suhu elektron plasma  $T_e$  sebesar  $1,77 \times 10^4$  K  $\approx 1,50$  eV.

**Kata kunci:** emitter, plasma, bejana emiter (BE), lucutan, kerapatan, suhu

**Abstract** – The determination of plasma electron parameters in the Emitter Vessel (EV) based on arc discharge value of air gas has been conducted at 10 kV of Ignitor Discharge Power Supply (IDPS) and 1 kV of anode voltage for Arc Discharge Power Supply (ADPS). The air gas pressure was varied from  $5.70 \times 10^{-3}$  Torr to  $7,90 \times 10^{-3}$  Torr. The EV was made from Stainless Steel-304 (SS-304) cylindrical shape with diameter  $\phi$  of 4.00 cm and length  $l$  of 66 cm, fitted with  $60.00$  cm  $\times$   $2.60$  cm grid and covered with a frame consisting of 15 groups of holes (each containing 10 holes small diameter  $\phi$  of 0.4 cm). From the experiment result at the average air gas pressure of about  $6.80 \times 10^{-3}$  Torr, it was obtained 4.17 A of extracted pulse electron beam current at 5 kV of extracted high voltage. Based on that extracted electron beam current, it was obtained  $3.15 \times 10^{12}$  particles/cm<sup>3</sup> of plasma electron density  $n_e$  and  $1.77 \times 10^4$  K  $\approx 1.50$  eV of plasma electron temperature  $T_e$ .

**Key words:** emitter, plasma, emmitter vessel (EV), discharge, density, temperature

## I. PENDAHULUAN

Bejana Emiter (BE) adalah pembangkit berkas elektron yang merupakan komponen penting dalam perangkat Radiator Elektron Pulsa (IEP). Berkas elektron tersebut dibentuk oleh adanya emisi atau ekstraksi elektron dari permukaan plasma menuju suatu target setelah melewati sistem grid. BE dapat menghasilkan keluaran berkas elektron berpenampang luas dan berarus besar, sehingga akan bermanfaat untuk aplikasi pada permukaan bahan datar yang luas.

Dibandingkan dengan Mesin Berkas Elektron (MBE) yang beroperasi secara kontinyu, maka MBE pada sistem Sumber Elektron Katoda Plasma (SEKP) akan lebih menguntungkan. Hal ini mengingat jenis MBE kontinyu menggunakan sumber elektron jenis filamen, tabung akselerator, sistem pemfokus dan sistem pemayar (*scanning system*) berkas elektron [1]. Masalah yang mungkin timbul pada MBE adalah harganya mahal, bentuknya cukup besar dan kurang kompak, serta berkas elektron yang mengenai permukaan bahan target masih kurang seragam. Untuk menjawab dan menyelesaikan masalah tersebut, maka diperlukan jenis MBE pulsa atau

IEP. IEP sangat menjanjikan untuk digunakan dalam berbagai industri antara lain dalam bidang kesehatan, untuk industri pengolahan lateks karet alam, modifikasi permukaan pada industri semikonduktor dan polimer [2]. Pada prinsipnya IEP akan relatif lebih sederhana dan mudah perawatannya karena tidak menggunakan semua modul seperti yang digunakan pada MBE kontinyu.

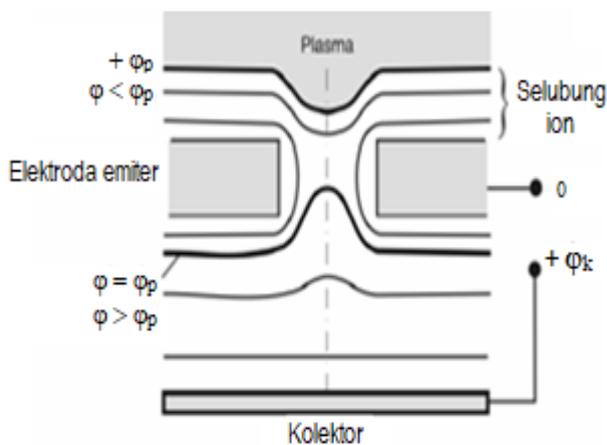
Pada IEP, plasma dapat terbentuk setelah adanya spot plasma di permukaan katode tembaga pada modul elektroda pemicu dan baru dilanjutkan lucutan plasma akibat beda potensial antara katoda (sistem elektroda) dengan anoda generator plasma di dalam BE. Timbulnya spot plasma dipasok oleh adanya sumber daya *Ignitor Discharge Power Supply* (IDPS) orde puluhan kV, sedangkan terjadinya plasma dipasok oleh adanya sumber daya *Anode Discharge Power Supply* (ADPS). Dalam BE, elektron pada permukaan/batas plasma 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 yang idealnya orde ratusan kV menuju target melalui sistem grid.

Arus berkas elektron plasma yang keluar dari *grid* merupakan perkalian luasan *grid* dengan rapat arus berkas elektron  $j_e$ . Rapat arus berkas elektron  $j_e$  ditentukan oleh 2 (dua) parameter meliputi kerapatan elektron  $n_e$  dan suhu elektron plasma  $T_e$  di dalam BE. Dengan demikian penentuan nilai kedua parameter ini dalam suatu bejana BE sangat penting untuk dilakukan. Besar arus berkas elektron plasma dapat diukur dengan alat bantu Faraday cup dan atau koil Rogowski [3]. Tujuan dari penelitian ini adalah dapat ditentukannya harga parameter plasma (kerapatan elektron  $n_e$ , suhu elektron plasma  $T_e$ ) di dalam bejana emitem BE yang merupakan salah satu modul IEP hasil rancang bangun di PSTA BATAN Yogyakarta.

## II. LANDASAN TEORI

Bejana Emitem (BE) merupakan peralatan lucutan penghasil plasma dengan batasan dari mana elektron diemisikan atau diekstraksikan. Emisi ion dari plasma dan emisi elektron dari plasma tidak mempunyai fenomena yang sama (tidak hanya karena adanya perbedaan polaritas tegangan ekstraksi), namun yang menjadi kunci adalah berhubungan dengan bagaimana partikel bermuatan dapat terekstraksi dari plasma.

Pada BE keadaan yang paling khusus adalah plasma mempunyai potensial yang relatif lebih besar terhadap potensial elektroda emitem (dinding BE) sehingga dapat menimbulkan perbedaan potensial yang berakibat adanya perpindahan muatan dari plasma ke arah ruang pemercepat melalui jendela/*grid* yang terpasang pada dinding plasma. Ini berarti bahwa ion diemisikan dari permukaan plasma (terbuka), tetapi elektron harus mengatasi penghalang potensial ( $\phi$ ) untuk ekstraksi dari plasma menuju ke daerah percepatan. Emisi elektron plasma (potensial plasma  $\phi_p$ ) dengan penghalang potensial adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Jadi fenomena emisi elektron plasma adalah tak lebih sederhana dari pada ekstraksi ion dari plasma. Untuk pembentukan berkas elektron, penambahan potensial kolektor  $\phi_k$  atau tegangan ekstraksi  $U_a$  harus sesuai dengan penambahan kecepatan ( $v$ ) dan tenaga ( $W$ ) untuk ion atau elektron [4].



**Gambar 1.** Emisi elektron plasma (potensial plasma  $\phi_p$ ) dengan penghalang potensial.

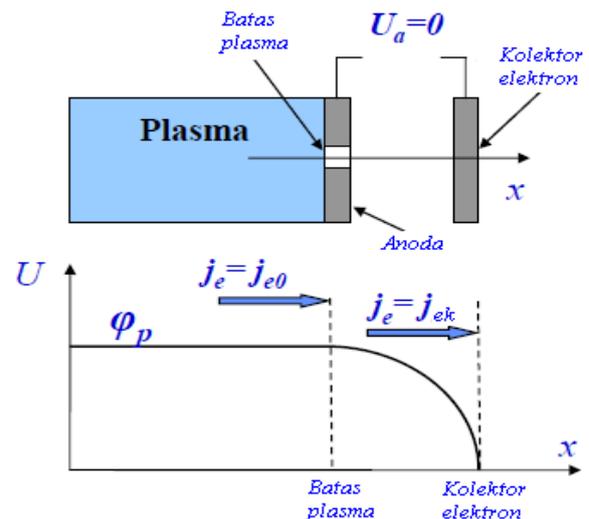
Untuk ekstraksi ion dari plasma keadaan ini secara otomatis dipenuhi karena ion selanjutnya hanya dipercepat oleh medan listrik pemercepat eksternal. Namun keadaan yang sangat berbeda akan terjadi untuk emisi/ekstraksi elektron dari plasma. Elektron di dekat selubung ion (*ion sheath*) diperlambat sedang untuk ion dipercepat [5]. Untuk lolos dari plasma elektron harus dapat mengatasi penghalang potensial, oleh karenanya persamaan umum untuk kerapatan arus elektron ke kolektor  $j_e$  diberikan oleh persamaan Boltzmann [6].

$$j_e = j_{e0} \exp\left(\frac{-e(\phi_p - \phi_k)}{kT_e}\right), \quad (1)$$

dengan  $j_e$  kerapatan arus elektron plasma,  $j_{e0}$  kerapatan arus elektron plasma jenuh/maksimum,  $e$  muatan elektron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C),  $\phi_p$  potensial plasma,  $\phi_k$  potensial kolektor,  $k$  tetapan Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23}$  J/K), dan  $T_e$  suhu elektron plasma. Untuk besaran fisis kerapatan arus elektron plasma jenuh/maksimum  $j_{e0}$  dapat dinyatakan sebagai

$$j_{e0} = \frac{1}{4} e n_e v = e n_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}}, \quad (2)$$

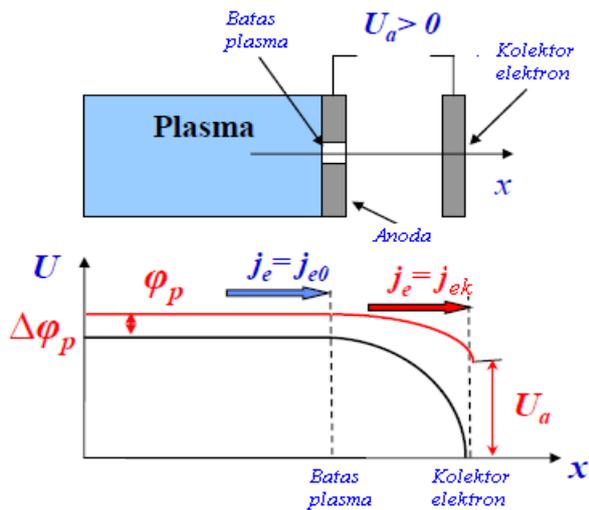
dengan  $n_e$  kerapatan plasma,  $v$  kecepatan relativistik elektron, dan  $m$  massa elektron ( $9,109 \times 10^{-31}$  kg). Pada persamaan (1) ditunjukkan bahwa walaupun tidak ada tegangan ekstraksi di anoda/kolektor ( $U_a = 0$ ), tetapi tetap ada arus yang mengalir menuju ke kolektor namun dengan besar kerapatan arus  $j_e$  yang menurun secara eksponensial. Emisi elektron dari plasma tanpa tegangan penarik  $U_a$  yakni  $U_a = 0$  adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Emisi elektron dari plasma tanpa tegangan ekstraksi ( $U_a = 0$ ).

Kalau selanjutnya tegangan ekstraksi/tegangan anoda  $U_a$  dinaikkan sehingga lebih besar dari nol dan lebih kecil dari pada potensial plasma ( $0 < \phi_k < \phi_p$ ) maka akan diperoleh persamaan baru untuk rapat arus berkas elektron  $j_{ek}$  pada saat potensial kolektor sebesar  $\phi_k$ . Jika nilai  $j_{ek}$  naik, maka nilai potensial plasma  $\phi_p$  juga naik yang akan menaikkan halangan potensial (untuk elektron) di permukaan dinding BE dan meloloskan plasma

elektron ke elektroda lain (tidak ke kolektor). Emisi elektron dengan tegangan ekstraksi  $0 < \phi_k < \phi_p$  mengalami kenaikan potensial plasma ditunjukkan pada Gambar 3.

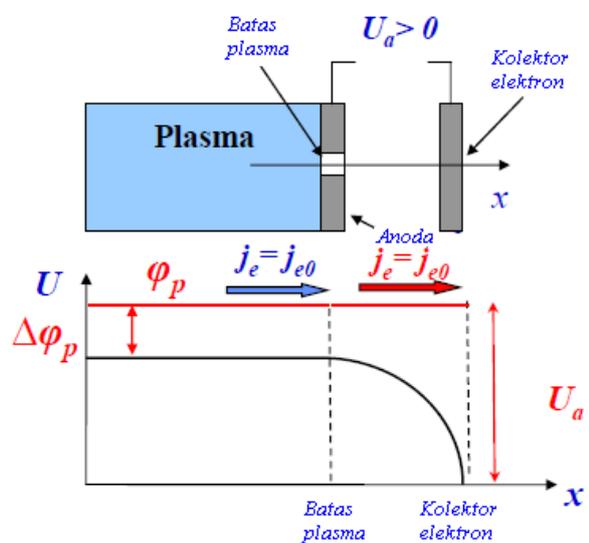


Gambar 3. Emisi elektron dari plasma dengan tegangan ekstraksi  $U_a$  saat potensial  $0 < \phi_k < \phi_p$ .

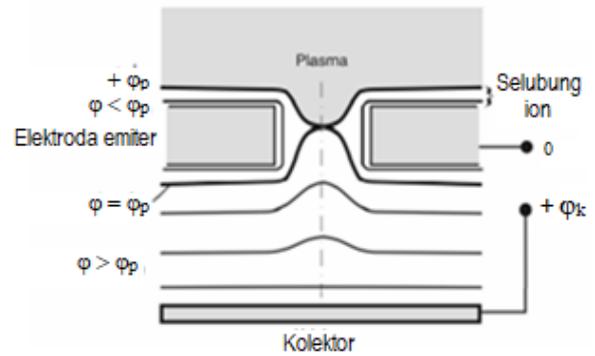
Emisi elektron untuk tegangan ekstraksi elektron  $U_a$  dengan potensial kolektor  $\phi_k$  sama dengan potensial plasma  $\phi_p$  ( $\phi_k = \phi_p$ ) ditunjukkan pada Gambar 4, sedang emisi elektron plasma tanpa penghalang potensial ditunjukkan pada Gambar 5 [7]. Dalam keadaan ini rapat arus emisi elektron  $j_e$  mencapai nilai jenuh (maksimum) dengan nilai yang jauh lebih tinggi dari pada arus emisi elektron awal ( $U_a = 0$ ).

Walaupun arus emisi elektron naik tetapi pada tingkatan ini elektron sampai di kolektor masih tanpa tenaga (nol). Faktor naiknya arus emisi elektron adalah  $N$  yang dinyatakan dengan

$$N = \exp\left(\frac{e\phi_p}{kT_e}\right) \tag{3}$$



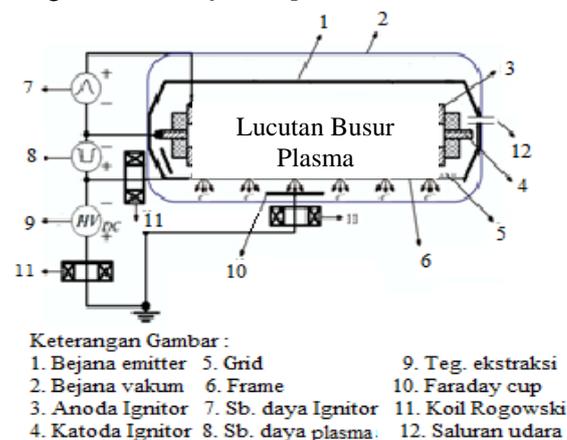
Gambar 4. Emisi elektron dari plasma dengan tegangan ekstraksi  $U_a$  saat potensial  $0 < \phi_k < \phi_p$ .



Gambar 5. Emisi elektron plasma (potensial plasma  $\phi_p$ ) dengan tanpa penghalang potensial.

### III. METODE PENELITIAN/EKSPERIMEN

Penentuan parameter plasma dalam BE dilakukan dengan melibatkan penggunaan modul sistem BE, gas udara, detektor kevakuman/meter vakum Penning AIMX dengan TIC Instrument, rangkaian IDPS dan ADPS, Osiloskop (*Digital Storage Oscilloscope GDS-1000 Series*), dan unit komputer/laptop. Bejana emitter BE berada di dalam bejana sistem IEP, dibuat dari material *Stainless Steel SS-304* berbentuk silinder dengan ukuran diameter  $\phi = 4,00$  cm dan panjang  $l = 66$  cm, sedang di atasnya dipasang *grid* berukuran  $60 \text{ cm} \times 2,6 \text{ cm}$  yang ditutup *frame* dengan sejumlah 15 grup lubang (tiap grup berisi 10 lubang kecil dengan diameter masing-masing sebesar  $\phi = 0,4$  cm). Dalam BE terdapat elektroda (*ignitor*) dengan katoda berbentuk silinder pejal dari bahan Mg dengan diameter  $\phi = 6,35$  mm dan panjang  $l = 76,75$  mm. Bagian anoda dipisahkan oleh isolator teflon berbentuk cincin dengan diameter dalam  $\phi_d = 6,35$  mm dan diameter luar  $\phi_l = 9,50$  mm serta panjang  $l = 30$  mm, sedang anoda terbuat dari *stainless steel SS-304* berbentuk silinder dengan diameter dalam  $\phi_d = 81,53$  mm dan diameter luar  $\phi_l = 88,53$  mm serta tebal  $t = 3,0$  mm [8]. Bejana emitter BE yang merupakan sumber elektron yakni tempat terjadinya lucutan busur plasma dengan menggunakan banyak lubang keluaran berkas pada perangkat IEP ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema diagram BE sebagai sumber elektron plasma pada perangkat IEP.

Pemasukan gas (udara) dilakukan pada sistem bejana emiter (1) melewati bejana vakum (2). Sistem elektroda pembentuk plasma, mempunyai dua sumber daya yaitu sumber daya ignitor (7) dan sumber daya generator plasma (8). Sumber daya ignitor mempunyai spesifikasi tegangan 10 kV, dan energi 100 mJ mengalirkan tegangan dari katoda (4) menuju anoda ignitor (3) melalui isolator akan membentuk spot plasma di permukaan katoda. Bejana vakum (2) dapat berfungsi sebagai bejana Iradiator Elektron Pulsa (IEP) apabila dipasang jendela keluaran ekstraksi berkas elektron, dan dihubungkan dengan sumber daya generator plasma dengan tegangan 1 kV. Proses lucutan permukaan pada bejana plasma dilakukan pada tekanan vakum sekitar  $10^{-5}$  Torr dan jarak *Faraday cup* dengan lubang ekstraksi 5 cm. Kemudian *spot plasma* yang terbentuk akan dihamburkan oleh tegangan sumber daya generator plasma. Hamburan *spot plasma* yang dipercepat oleh tegangan sumber daya generator plasma akan mengionisasi gas dalam bejana plasma sehingga terbentuk lucutan busur plasma di seluruh permukaan anoda berongga. Tegangan ekstraksi (9) berfungsi untuk menarik/mengekstrak elektron pada permukaan plasma. Elektron diekstrak melalui grid (5) dan *frame* (6) kemudian dipercepat sampai menabrak *Faraday cup* (10) yang selanjutnya diukur arusnya menggunakan koil Rogowski.

Bejana emiter BE yang berada di dalam bejana vakum dilengkapi oleh 3 (tiga) buah sumber daya (yang digunakan untuk lucutan ignitor, lucutan plasma busur dan ekstraksi berkas elektron), alat deteksi berkas elektron *Faraday cup* dan koil Rogowski menjadi satu unit modul pada peralatan Iradiator Elektron Pulsa (IEP).

Arus lucut berkas plasma dalam bejana emiter dapat ditentukan dengan menggunakan alat bantu *Faraday cup* untuk menampung arus berkas elektron yang menumbuk dan koil Rogowski (yang dapat dibuat sendiri) untuk menghitung besar arus lucutan serta Osiloskop (*Digital Storage Oscilloscope GDS-1000 Series*) untuk mengamati bentuk keluaran pulsa.

Arus ekstraksi berkas elektron plasma dari BE (sistem ADPS) dengan koil Rogowski dapat ditentukan oleh [9]

$$I_t = \frac{2\pi a R C}{\mu A n} V_t \quad (4)$$

dengan  $I_t$  besar arus lucut plasma (A),  $a$  jejari mayor torus = jejari toroid (m),  $R$  resistansi integrator ( $\Omega$ ),  $C$  kapasitansi integrator (F),  $\mu$  tetapan permeabilitas =  $\mu_0 \mu_r$ ,  $= 4\pi \times 10^{-7} \mu_r$  (Hm<sup>-1</sup>),  $V_t$  tegangan terukur (volt),  $A$  luas tampang lintang minor torus/toroid (m<sup>2</sup>) dan  $n$  jumlah kumparan/lilitan torus. Berdasarkan persamaan (6) apabila masing-masing tetapan dan besaran fisis dapat diketahui maka besar arus lucut  $I(t)$  pada BE (sistem ADPS) dapat ditentukan.

Bejana anoda berongga yang digunakan adalah berbentuk silinder dengan volume  $V$ , jejari  $r$  dan panjang  $l$  ( $V = \pi r^2 l$ ), maka kerapatan partikel elektron  $n_e$  dalam BE adalah jumlah partikel total dibagi dengan volume  $V$ . Muatan 1 (satu) coulomb untuk partikel elektron adalah sebanyak  $6,256 \times 10^{18}$  partikel, sedang muatan total  $Q$  yang merupakan hasil kali besar arus lucut  $I(t)$  dengan lebar pulsa  $\tau$  (dapat diperoleh dari hasil eksperimen) atau

$Q = I(t) \times \tau$ , maka kerapatan partikel/electron  $n_e$  dalam BE dapat dihitung dengan [10]

$$n_e = \frac{(6,256 \times 10^{18}) \times I(t) \times \tau}{\pi r^2 l} \quad (5)$$

Untuk penentuan parameter suhu elektron plasma  $T_e$  dapat dihitung dari persamaan (2) yang merupakan persamaan untuk rapat arus lucut elektron jenuh/maksimal  $j_e$  pada suatu nilai tegangan ekstraksi  $U_a$  tertentu (Gambar 4) yaitu dapat dinyatakan dalam bentuk

$$T_e = \frac{2\pi m_e j_e^2}{e^2 n_e^2 k} \quad (6)$$

dengan  $T_e$  suhu elektron plasma,  $m_e$  massa elektron =  $9,109 \times 10^{-31}$  kg,  $e$  muatan elektron =  $1,602 \times 10^{-19}$  C,  $n_e$  kerapatan plasma, dan  $k$  tetapan Boltzmann =  $1,381 \times 10^{23}$  J/K.

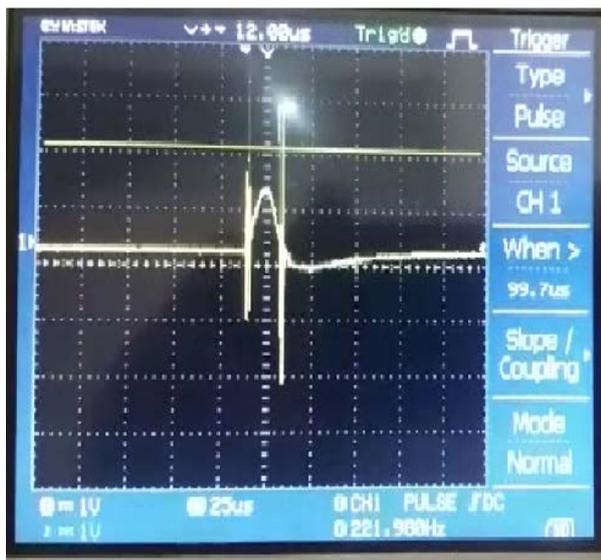
#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan pengamatan sistem lucutan *Ignition Discharge Power Supply* (IDPS) dan sistem lucutan *Arc Discharge Power Supply* (ADPS) pada perangkat Bejana Emmitter. Tekanan gas kerja pada bejana emiter untuk optimasi operasional IDPS dan ADPS dilakukan dengan memvariasi tekanan gas (udara). Dari hasil eksperimen lucutan sistem IDPS dan ADPS mendekati optimal pada variasi tekanan udara antara  $5,7 \times 10^{-3}$  Torr sampai dengan  $7,9 \times 10^{-3}$  Torr, berkas elektron dapat ditangkap dengan bantuan *Faraday cup*, besar pulsa arus berkas dapat diukur dengan bantuan koil Rogowski, sedang tampilan bentuk dan ukuran pulsa lucutannya dapat dipantau dengan osiloskop. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa IDPS mudah menyala pada kevakuman rendah sedang untuk ADPS mempunyai karakteristik yang berlawanan dengan IDPS yaitu diperoleh nyala yang baik pada kevakuman tinggi. Kevakuman dengan  $5,7 \times 10^{-3}$  Torr sampai  $7,9 \times 10^{-3}$  Torr ideal untuk membuat spot plasma dengan tegangan IDPS 10 kV pada perangkat IEP seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7, namun kondisi besaran kevakuman ini masih kurang baik untuk nyala/pulsa ADPS.

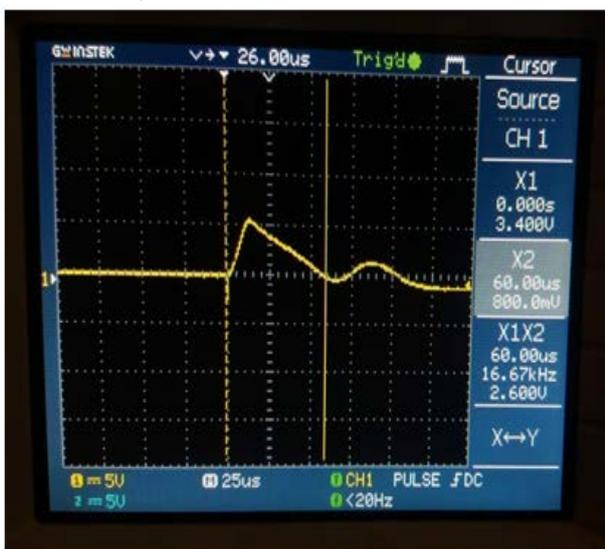


Gambar 7. Spot plasma dalam BE pada kevakuman  $6,8 \times 10^{-3}$  Torr dan tegangan 10 kV.

Tekanan yang paling ideal (optimal) untuk membuat spot plasma (sistem IDPS) dan plasma busur (sistem ADPS) BE pada tegangan lucut ignitor 10 kV adalah pada tekanan sekitar  $6,8 \times 10^{-3}$  Torr. Pada tekanan tersebut dengan alat bantu *Digital Storage Oscilloscope GDS-1000 Series*, diperoleh keluaran tegangan dengan bentuk pulsa untuk sistem IDPS dan ADPS seperti ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9. Nilai arus lucut  $I_{ADPS}$  yang sesuai dengan berbagai tekanan  $P$  dapat ditentukan menggunakan alat bantu *Faraday cup* (untuk menangkap arus berkas elektron pulsa) dan persamaan (6) hasil dari penjabaran koil Rogowski dengan spesifikasi harga besaran yang digunakan antara lain  $a = 10,56 \times 10^{-3}$  m,  $R = 100 \Omega$ ,  $C = 2,2 \times 10^{-6}$  F,  $\mu = \mu_o \times \mu_r = (4\pi \times 10^{-7})$  (93)  $Hm^{-1}$ ,  $A = 75,68 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup> dan  $n = 80$  lilitan, sedang untuk nilai tegangan terukur  $V_i$  besarnya tergantung tekanan  $P$  yang digunakan.



**Gambar 8.** Pulsa tegangan terukur ( $V_i = 0,7$  volt,  $\tau = 25 \mu s$ ) untuk penentuan arus IDPS pada tekanan udara  $6,8 \times 10^{-3}$  Torr.



**Gambar 9.** Pulsa tegangan terukur ( $V_i = 2,50$  volt,  $\tau = 30 \mu s$ ) untuk penentuan arus ADPS pada tekanan udara  $6,8 \times 10^{-3}$  Torr.

Dari hasil eksperimen penentuan arus lucut busur yang optimum yakni atas dasar persamaan (6) diperoleh sebesar  $I_{ADPS-Opt.} = 4,17$  A saat dipasang tegangan ekstraksi 5 kV dan terjadi saat dioperasikan dengan tekanan gas udara sebesar  $P = 6,8 \times 10^{-3}$  Torr. Selanjutnya menggunakan persamaan (5) dan mensubstitusikan besaran muatan total  $Q = 4,17 \times 10^{-4}$  partikel, serta BE adalah bentuk silinder dengan jejari  $r = 2$  cm = 0,02 m dan panjang  $l = 66$  cm = 0,66 m maka diperoleh nilai kerapatan partikel elektron dalam BE sebesar  $n_e = 3,15 \times 10^{18}$  partikel/m<sup>3</sup> =  $3,15 \times 10^{12}$  partikel/cm<sup>3</sup>.

Selanjutnya untuk besar temperatur elektron plasma  $T$  dalam BE dapat ditentukan dari persamaan (6) dengan substitusi besaran kerapatan partikel elektron  $n_e = 3,15 \times 10^{18}$  partikel/m<sup>3</sup> dan konstanta-konstanta untuk muatan elektron  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C, tetapan Boltzmann  $k = 1,381 \times 10^{23}$  J/K, dan massa elektron  $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$  kg, memberikan temperatur elektron plasma dalam BE sebesar  $T_e = 1,77 \times 10^4$  K  $\approx 1,50$  eV. Kedua nilai parameter elektron plasma  $n_e$  dan  $T_e$  tersebut telah sesuai dengan yang diharapkan karena menurut literatur untuk kondisi pengerjaan secara eksperimen untuk nilai  $n_e$  berkisar antara  $10^{12}$  hingga  $10^{14}$  partikel/cm<sup>3</sup> dan untuk nilai  $T_e$  adalah hanya dalam beberapa eV [6]. Secara perhitungan/simulasi telah ditentukan besar jejari arus berkas elektron optimum adalah sebesar  $r = 2,00$  mm dan arus lucut plasma  $I_{ADPS-Opt.} = 4,17$  A, maka rapat arus plasma  $J_{(r:2mm)} = 0,33 \times 10^2$  A/cm<sup>2</sup>. Nilai besaran fisis rapat arus plasma yang diperoleh tersebut (sistem ADPS) belum sesuai dengan harapan dalam arti sangat jauh selisihnya dengan nilai kerapatan arus spotnya, mengingat besar/nilai rapat arus *plasma spot* (sistem IDPS) pada sistem sumber elektron katoda plasma adalah  $j_s = (10^6 - 10^8)$  A/cm<sup>2</sup> [12].

Perolehan selisih yang sangat besar antara rapat arus lucutan busur plasma (ADPS) dengan rapat arus lucutan *spot plasma* (IDPS) adalah karena masih kecilnya pemakaian tegangan ekstraksi berkas elektron ( $U_a = 5$  kV) sehingga otomatis nilai prosentase efisiensi grid juga ikut berkurang, dalam arti banyak arus berkas elektron plasma yang bocor tidak melalui grid. Rapat arus berkas elektron plasma yang paling optimum terjadi ketika potensial plasma dalam BE sama dengan potensial kolektor yang dipasang. Pada eksperimen selanjutnya untuk dapat lebih memperbesar nilai rapat arus plasma yang terekstraksi (ADPS) perlu adanya tegangan ekstraksi  $U_a$  (yang dapat divariasi) hingga orde ratusan kilovolt atau sekitar  $U_a = (150-200)$  kV [11].

**V. SIMPULAN**

Telah dilakukan penentuan parameter plasma yang meliputi kerapatan elektron plasma  $n_e$  dan suhu elektron plasma  $T_e$  di dalam BE yang merupakan sumber elektron plasma (di dalam peralatan IEP) dari bahan *Stainless Steel SS-304* bentuk silinder berdiameter  $\phi = 4,00$  cm dan panjang  $l = 66$  cm. Penentuan parameter plasma dilakukan pada tegangan keluaran ignitor  $V = 10$  kV untuk sistem *Ignitor Discharge Power Supply* (IDPS) dan tegangan anoda  $V = 1$  kV untuk sistem *Arc Discharge Power Supply* (ADPS). Dari hasil eksperimen pada

tekanan gas udara rerata  $6,8 \times 10^{-3}$  Torr serta dengan alat bantu *Faraday cup* dan koil Rogowski diperoleh arus berkas elektron pulsa terekstraksi dari BE sebesar  $I = 4,17$  A pada tegangan tinggi ekstraksi sebesar  $V = 5$  kV. Atas dasar besar arus terekstraksi serta menggunakan rumus yang terkait diperoleh kerapatan plasma elektron sebesar  $n_e = 3,15 \times 10^{12}$  partikel/cm<sup>3</sup> dan suhu elektron plasma sebesar  $T_e = 1,77 \times 10^4$  K  $\approx 1,50$  eV. Kedua nilai parameter elektron plasma  $n_e$  dan  $T_e$  yang diperoleh telah sesuai dengan yang diharapkan dalam arti telah berada dalam kisaran nilai yang disebutkan dalam pustaka. Untuk perolehan parameter arus berkas elektron pulsa masih perlu peningkatan, misalnya menggunakan modul tegangan pemercepat yang sesuai (orde ratusan kV) sedemikian sehingga arus berkas elektron dapat diaplikasikan dalam teknologi iradiasi permukaan yang bermanfaat.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua rekan di kelompok kegiatan Sumber Elektron Katoda Plasma, serta kepada semua personil yang telah membantu sebagai nara sumber dalam kegiatan penelitian di PSTA BATAN Yogyakarta (Prof. Sudjatmoko, SU, Drs. Widdi Usada, Bambang Siswanto S.Si, Ir. Wiryoadi) sehingga penelitian ini dapat diselesaikan. Semoga amal baik rekan-rekan semua mendapatkan balasan yang berlipat dari Allah SWT.

### PUSTAKA

1. Djoko Slamet Pudjorahardjo, Suprpto, Darsono, *et al.*, Simulation study of electron beam spot size from thermionic electron gun using SIMION 8.1 Software, *AIP Conference. Proceedings*, vol. 2014 (2018) 020156-1 - 020156-9.
2. Purwadi Rahardjo, Ken Uemura, N.N. Koval, *et al.*, Application of large area plasma-cathode electron beam for natural rubber vulcanization, *15<sup>th</sup> Symposium on High Current Electronic Proceedings*, Tomsk (2008) 497 – 501.
3. A. Purwadi, Suprpto, A. Sekar, *et al.*, Method For Determining Electrons Current Extracted From Plasma Generator Vessel Used For Simulation Of Electron Beam Trajectory Using Simion-8 Software, *AIP Conference. Proceedings*, vol. 2014 (2018) 020100-1 - 020100-9.
4. Efim Oks, *Plasma Cathode Electron Sources, Physics, Technology, Applications, Institute of High Current Electronics (IHCE), RAS, 2/3 Akademichisky Ave, 634055 Russia. Translated from Russian by Titiana, Cherkashina and Anna Korovina* Dec. (2006) 23-57.
5. Efim Oks, *Lecture 3 (Oral Session) Introduction of Plasma Cathode Electron Source*, presented in BATAN Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia, December 5-9 (2011).
6. A. Purwadi, Taufik, L. Susita, *et al.*, Electron beam extraction on plasma cathode electron sources system. *AIP Conference. Proceedings*, vol. 1824 (2017) 030031-1 - 030031-10.
7. Efim Oks, *Lecture 7 (Oral Session) Introduction of Plasma Cathode Electron Source*, presented in BATAN Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia, December 5-9, 2011.
8. I. Aziz, A.A. Harumningtyas, A. Purwadi, Pembuatan dan uji fungsi sistem elektroda ignitor untuk perangkat iradiator elektron pulsa berbasis SEKP, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar dan Iptek Nuklir*, ISSN 0216-3128, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Yogyakarta, 28 November 2017, hal. 145-150.
9. A. Purwadi, W. Usada, B. Siswanto, *et al.*, Anoda ekstraktor elektron pada bejana generator plasma dan penentuan besar arus berkas elektronnya, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, ISSN 1411-1349, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, vol.14 (2012) 152-160.
10. A. Purwadi, B. Siswanto, Wiryoadi, *et al.*, Plasma characteristics in square pulse arc discharge of plasma cathode electron source device, *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra, Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology* 16 (2013) 109-114.
11. M.S. Vorobyov, N.N. Koval and S.A. Sulakshin, An Electron Source with a Multiaperture Plasma Emitter and Beam Extraction into the Atmosphere, *Experiments and Experimental Techniques* 58 (2015) 687-695, Pleiades Publishing, Ltd. 2015, Original Russian Text, Published in *Pribory i Tekhnika Eksperimenta* (2015) 112-120.