

# KONSEP PEROLEHAN ARUS EKSTRAKSI ELEKTRON PLASMA TERMAL PADA PERALATAN SISTEM SUMBER ELEKTRON KATODA PLASMA

Agus Purwadi

PKSTA – BATAN, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb Yogyakarta 55281

agus.p@batan.go.id

## ABSTRAK

**KONSEP PEROLEHAN ARUS EKSTRAKSI ELEKTRON PLASMA TERMAL PADA PERALATAN SISTEM SUMBER ELEKTRON KATODA PLASMA.** Telah dipelajari syarat perolehan arus ekstraksi elektron plasma dan penerapannya dalam mengulas hasil eksperimen pengukuran arus ekstraksi elektron pada peralatan sistem Sumber Elektron Katoda Plasma (SEKP). Perolehan arus ekstraksi elektron pada SEKPA bergantung pada bentuk dan ukuran Bejana Generator Plasma (BGP) yang sebanding dengan luas anoda  $S_a$ , luas jendela ekstraksi/emisi elektron  $S_e$  dan tetapan parameter lucutan plasma  $G$ . Penggunaan luas anoda  $S_a = 770,4 \text{ cm}^2$  dan luas jendela ekstraksi/emisi elektron  $S_e = 90 \text{ cm}^2$  dari hasil analisis secara teori telah memenuhi syarat untuk perolehan arus ekstraksi elektron termal senilai  $I_e = 34,3 \text{ A}$  dengan menggunakan tegangan ekstraksi  $U_{eks} = 3 \text{ kV}$  (efisiensi ekstraksi  $\alpha = 25,9 \%$ ). Tetapan parameter lucutan plasma  $G$  tipe lucutan busur pada sistem SEKPA ini adalah  $G < S_a/S_e$  atau  $G < 8,5$ .

Kata kunci : elektron plasma, ekstraksi/emisi elektron, elektron termal, SEKPA

## ABSTRACT

**OBTAINING CONCEPT OF THERMAL PLASMA ELECTRON CURRENT ON THE DEVICE OF PLASMA CATHODE ELECTRON SOURCES SYSTEM.** It has been studied the obtaining concept as well as the applying for enveloping the experiment yield of measuring thermal electron extraction current on the device of Plasma Cathode Electron Sources (PCES) System. The desired of obtaining thermal electron extraction current on the device of PCES System depends on the size and geometry of Plasma Generator Chamber (PGC) which proportional to anode area of  $S_a$ , electron emission/extraction window area of  $S_e$  and constant of the plasma discharge parameter  $G$ . From the analyzing theory, for anode area of  $S_a = 770,4 \text{ cm}^2$  and electron extraction window area of  $S_e = 90 \text{ cm}^2$ , it is resulted a fulfilled condition for obtaining the thermal electron extraction current as value of  $I_e = 34,3 \text{ A}$  with using extraction voltage of  $U_{eks} = 3 \text{ kV}$  (extraction efficiency  $\alpha = 25,9 \%$ ). Constant of plasma discharge parameter  $G$  for arc discharge type on this PCES is  $G < S_a/S_e$  or  $G < 8,5$ .

Key words : plasma electron, electron emission/extraction, thermal electron, PCES

## PENDAHULUAN

Plasma dalam fisika sering dinamakan sebagai fase ke empat dari materi setelah fase padat, cair dan gas. Plasma yang *quasi netral*, merupakan campuran antara partikel ion, elektron, radikal bebas dan molekul/atom yang peka terhadap medan listrik dan medan magnet. Bila suatu gas dipanaskan sampai pada suhu yang spesifik untuk bahan maka atom-atom penyusunnya akan terurai/terionisasi menjadi elektron dan ion positif. Kalau pemanasan dilanjutkan, maka jumlah ion dan elektron semakin bertambah, sehingga pada saat mencapai suatu batas tertentu, maka muatan akan berada dalam keadaan setimbang dengan atom-atom penyusunnya menjadi plasma. Konsentrasi elektron-ion minimum dalam

plasma sekitar 5% sedang konsentrasi maksimum dapat mencapai 100% [1].

Sumber Elektron Katoda Plasma (SEKP) adalah suatu generator berkas elektron dengan berkas elektron tersebut terbentuk oleh emisi atau ekstraksi elektron dari permukaan plasma. Pada permukaan plasma di dalam Bejana Generator Plasma (BGP) hanya elektron plasmanya yang diekstraksi keluar menuju ke daerah pemercepat melalui jendela emisi (grid) yang terpasang pada dinding BGP. Berkas elektron yang terekstraksi diarahkan menuju ruangan pemercepat untuk diperbesar tenaganya oleh tegangan tinggi pemercepat eksternal dan selanjutnya berkas elektron diiradiasikan ke suatu target (bertekanan atmosfer) setelah melewati jendela foil pada bejana MBE Pulsa.

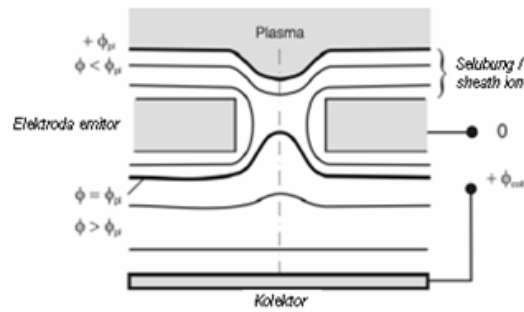
Tahap kegiatan yang merupakan salah satu sasaran dari kegiatan tahun 2014 adalah uji fungsi SEKP dalam menghasilkan arus emisi berkas elektron dari BGP. Untuk mencapai sasaran kegiatan tersebut diantaranya telah dilakukan konstruksi sistem ekstraksi elektron pada grid elektroda generator plasma dan diukur arus ekstraksi berkas elektronnya menggunakan alat ukur koil Rogowski [2].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuktikan bahwa agar diperoleh arus ekstraksi elektron plasma termal pada sistem SEKP maka untuk penggunaan bentuk dan ukuran BGP tertentu juga harus digunakan ukuran luas anoda  $S_a$ , luas jendela ekstraksi elektron  $S_e$  yang tertentu serta nilai tetapan parameter lucutan plasma  $G$  yang terjadi di dalam BGP juga harus tertentu. Relasi antara parameter  $S_a$ ,  $S_e$  dan  $G$  dibahas dalam tulisan ini, sedemikian sehingga diperoleh suatu persamaan syarat untuk terjadinya ekstraksi elektron. Arus ekstraksi elektron termal yang teremisi dari permukaan plasma pada SEKP, dapat dibuktikan dengan metoda adanya (atas dasar) kesetimbangan arus lucutan yang terjadi antara arus lucutan busur ( $I_d$ ) dengan jumlahan arus anoda ( $I_a$ ) dan arus ekstraksi elektron ( $I_e$ ). Adapun nilai parameter  $G$  ditentukan atas dasar bentuk geometri dan ukuran BGP yang telah digunakan dalam eksperimen pengukuran arus ekstraksi plasma elektron dalam peralatan sistem SEKP.

## TEORI

Komponen plasma sebagian besar terdiri dari ion bermuatan positif dan elektron bermuatan negatif dengan kerapatan ion  $n_i$  sama dengan kerapatan elektron  $n_e$  ( $n_i \approx n_e$ ) [3]. BGP atau emiter elektron plasma atau katoda plasma 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 terekstraksi dari plasma.

Pada SEKP keadaan yang paling khusus adalah plasma mempunyai potensial positif terhadap elektroda lucutan (emitor)[4]. Ini berarti bahwa ion diemisikan dari permukaan plasma (terbuka), tetapi elektron harus mengatasi penghalang potensial ( $\phi$ ) untuk ekstraksi dari plasma menuju ke daerah percepatan. Pada Gambar 1 ditunjukkan skematik emisi elektron plasma (tegangan potensial plasma  $\phi_p$ ) dengan penghalang potensial dan pada Gambar 2 ditunjukkan skematik emisi elektron plasma tanpa penghalang potensial [5].



**Gambar 1. Skematik emisi elektron plasma (tegangan potensial plasma  $\phi_p$ ) dengan penghalang potensial[5].**

Jadi fenomena emisi elektron plasma adalah tak lebih sederhana dari pada sederhananya ekstraksi ion dari plasma. Untuk pembentukan berkas elektron, penam-bahan potensial kolektor  $\phi_k$  atau tegangan ekstraksi  $U_{eks}$  harus sesuai dengan penambahan kecepatan ( $v$ ) dan tenaga ( $W$ ) untuk ion atau elektron [6]. 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. 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 [7].

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

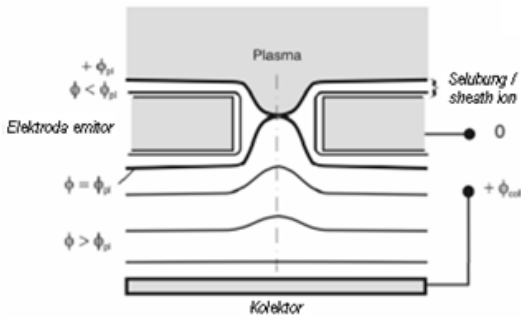
dengan

$$j_{e0} = e n_e v = \frac{1}{4} e n_e \sqrt{\frac{8kT_e}{4\pi m}} = e n_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}} \quad (2)$$

dan  $j_{e0}$  adalah kerapatan arus elektron plasma termal/maksimum,  $e$  = muatan elektron =  $1,602 \times 10^{-19}$  C,  $n_e$  = kerapatan plasma,  $v$  = kecepatan relativistik elektron,  $k$  = tetapan Boltzmann =  $1,381 \times 10^{-23}$  J/K,  $T_e$  = suhu plasma dan  $m$  = massa elektron =  $9,109 \times 10^{-31}$  kg.

Apabila nilai potensial kolektor  $\phi_k$  atau tegangan  $U_{eks}$  terus dinaikkan sedemikian sehingga nilainya sama dengan tegangan plasma  $\phi_p$  ( $U_{eks} = \phi_k = \phi_p$ ) maka bentuk persamaan (1) menjadi sama dengan persamaan (2) atau dapat dituliskan sebagai

$$j_e = j_{e0} = e n_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m}} \quad (3)$$



**Gambar 2. Skematik emisi elektron plasma (tegangan potensial plasma  $\phi_p$ ) dengan tanpa penghalang potensial [5].**

Pada Gambar 3 ditunjukkan skematik arus (emisi) elektron dari plasma ketika tegangan ekstraksi  $U_{eks}$  adalah  $U_{eks} = \phi_k = \phi_p$ . Arus emisi elektron  $j_e$  naik dan mencapai harga maksimum (jenuh) dan ini juga sering dinamakan dengan arus emisi elektron termal, yang nilainya sebagai fungsi dari parameter plasma (kerapatan plasma  $n_e$  dan suhu plasma  $T_e$ ).[8].

Plasma busur diekstraksi oleh tegangan ekstraksi melalui jendela emisi (yang terpasang pada dinding BGP) dengan ukuran panjang  $p$  dan lebar  $l$  atau seluas berkas elektron yang dapat mengenai kolektor dan dirumuskan sebagai

$$S_e = p \times l \tag{4}$$

Sedang BGP dalam bentuk silinder dengan ukuran panjang  $t$  dan jari  $r$  kalau jendela emisi yang terpasang pada dinding BGP mempunyai panjang  $p$  dan lebar  $l$  maka luas berkas elektron  $S_a$  yang dapat mengenai selubung dinding BGP tersebut dapat dirumuskan sebagai

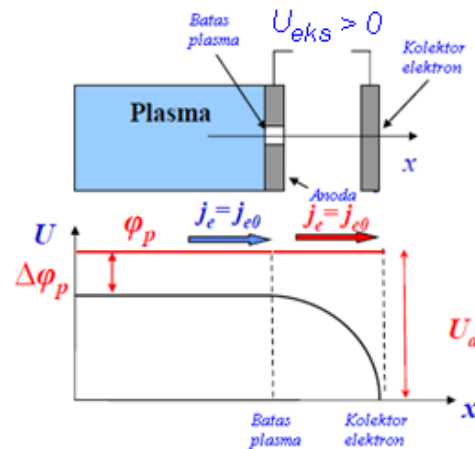
$$S_a = (2 \pi r^2 + 2 \pi r t) - S_e \tag{5}$$

Uji fungsi perangkat SEKP dapat dilakukan dengan mengukur nilai arus lucutan plasma spot pada sistem elektroda ignitor, arus lucutan plasma busur pada bejana generator plasma dan arus berkas elektron pada daerah percepatan elektron. Arus lucutan plasma spot dan plasma busur ditentukan dengan menggunakan unit koil Rogowski sedang arus berkas elektron ditentukan dengan unit koil Rogowski dan atau Faraday cup.

Syarat untuk terjadinya emisi elektron dari permukaan plasma ke daerah pemercepat berhubungan erat dengan nilai  $S_e$ ,  $S_a$  dan nilai parameter lucutan  $G$  yang digunakan dalam peralatan SEKP. Nilai parameter  $G$  bergantung pada jenis lucutan, apakah lucutan korona, lucutan bara/glow,

atau lucutan busur/arc yang terjadi di dalam BGP penghasil plasma, dengan nilai  $G$  berada dalam kisaran (range) 2 sampai dengan 20. Syarat yang harus dipenuhi untuk terjadinya ekstraksi elektron termal dan percepatan elektron pada daerah pemercepat elektron [9] adalah

$$G \frac{S_e}{S_a} < 1 \tag{6}$$



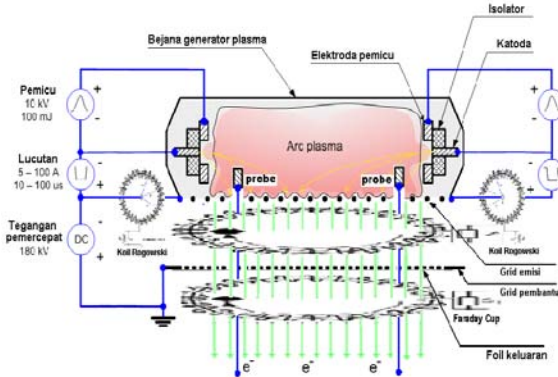
**Gambar 3. Skematik emisi elektron dari plasma dengan tegangan ekstraksi  $U_{eks}$  ( $0 < U_{eks} = \phi_p$ ) [8].**

### METODA DAN TATA KERJA

Skematik SEKP dengan alat pendukung pengukur arus lucutan (koil Rogowski) adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 4 [10]. BGP mempunyai dua buah sistem elektroda pemicu pembentuk plasma di sisi kiri dan kanan, dengan jendela emisi (grid emisi) yang dipasang pada dinding bejana generator plasma (bagian bawah) yang juga berperan sebagai anoda. Dua macam sistem elektroda pembentuk plasma adalah yang pertama sistem elektroda pemicu yang menginisiasi pembentukan lucutan plasma dan yang kedua merupakan sistem elektroda lucutan plasma antara katoda dengan anoda grid.

Sistem elektroda pemicu terdiri dari logam silinder pejal (katoda Mg), isolator silinder berongga (teflon) bersambungan ketat antara katoda Mg dan silinder anoda Stainless Steel (SS). Bejana generator plasma dan bejana mesin berkas elektron keduanya dalam bentuk silinder dan dapat dibuat dari bahan SS 304. Pelucutan sistem elektroda sumber elektron dilakukan pada kondisi tekanan gas kerja argon berorde  $10^{-4}$  mbar, menggunakan sistem IDPS (Ignitor Discharge Power Supply) dalam kisaran 10 kV 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 generator plasma oleh adanya beda potensial pada sistem ADPS (*Arc Discharge Power Supply*) dalam kisaran 1 kV antara katoda (sistem elektroda) dengan anoda (elektroda BGP).



**Gambar 4. Skematik SEKP dengan alat ukur arus lucutan (koil Rogowski) [10].**

Kalau nilai  $S_e$  dan  $S_a$  yang digunakan dalam eksperimen telah diketahui nilainya maka dapat ditelusuri apakah pemilihan ukuran luas jendela (lubang) emisi elektron  $S_e$  dan ukuran BGP yang berhubungan dengan nilai  $S_a$  tersebut telah memenuhi syarat untuk terjadinya arus emisi elektron termal dari permukaan plasma ke daerah percepatan. Penjabaran/analisis tersebut dilakukan dengan secara teori menggunakan hukum kekekalan arus lucutan atau kesetimbangan arus lucutan yang terjadi pada sistem SEKP sedemikian sehingga diperoleh rumus (6) yang merupakan syarat untuk terjadinya arus emisi elektron dari permukaan plasma ke daerah percepatan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Mengacu dari hasil eksperimen yang telah dilakukan menggunakan alat ukur koil Rogowski, diperoleh arus plasma busur di dalam bejana generator plasma senilai  $I_{lb} = I_{ADPS} = 132,3$  A dan hasil pengukuran arus ekstraksi berkas elektron pada daerah percepatan (tegangan ekstraksi  $V = 3$  kV) adalah senilai  $I_e = 34,3$  A (efisiensi ekstraksi  $\alpha = I_e / I_{lb} = 25,9$  %) [11]. Arus emisi tersebut diperoleh dengan menggunakan jendela emisi dengan panjang  $p = 60$  cm dan lebar  $l = 1,5$  cm yang berarti dengan menggunakan persamaan (4) luas jendela emisi  $S_e = (60 \times 1,5) \text{ cm}^2 = 90 \text{ cm}^2$ . Jendela emisi seluas  $S_e = 90 \text{ cm}^2$  tersebut terpasang pada dinding BGP bentuk

silinder dengan jejari  $r = 2$  cm dan panjang  $t = 66,5$  cm yang berarti menurut persamaan (5) luas berkas elektron yang dapat mengenai selubung dinding BGP atau luasan anoda yang dikenai elektron plasma adalah  $S_a = (2 \pi 2^2 + 2 \pi 2 \times 66,5) \text{ cm}^2 - 90 \text{ cm}^2 = 770,4 \text{ cm}^2$ . Atas dasar hasil eksperimen yang telah diperoleh untuk nilai arus ekstraksi elektron termal  $I_e = 34,3$  A ( $\alpha = 25,9$  %) tersebut dapat disimpulkan bahwa arus yang diukur pada SEKP tersebut sudah merupakan arus ekstraksi elektron termal yang teremisi dari jendela emisi karena menurut persamaan (6) syarat untuk nilai ( $G$ ) ( $S_e/S_a$ )  $< 1$  adalah ( $< 8,5$ ) ( $0,1 < 1$ ) telah dipenuhi, mengingat nilai konstanta parameter lucutan  $G$  untuk tipe lucutan busur pada sistem SEKP yang digunakan disini adalah antara 2 sampai dengan 8,5.

Pada bab teori sebelumnya telah dijelaskan bahwa untuk syarat terjadinya arus emisi elektron termal dari permukaan plasma ke daerah percepatan dapat diperoleh/dijabarkan dari hukum kekekalan arus lucutan yang terjadi pada sistem SEKP. Hukum kekekalan arus lucutan menunjukkan bahwa fraksi elektron dari arus lucutan plasma busur dalam BGP  $I_d$  terdiri dari arus anoda  $I_a$  atau ( $j_a S_a$ ) dan arus emisi (kolektor)  $I_e$  atau ( $j_e S_e$ ) yang dapat dituliskan

$$I_d = I_a + I_e = j_a S_a + j_e S_e \quad (7)$$

atau dapat dituliskan sebagai

$$I_d = j_{e0} S_a \exp[-e(\phi_p - \phi_a)/kT_e] + j_{e0} S_e \exp[-e(\phi_p - \phi_k)/kT_e] \quad (8)$$

Untuk ruas kiri dan kanan dibagi dengan  $I_d$  maka persamaan di atas menjadi

$$1 = G \exp[-e(\phi_p - \phi_a)/kT_e] + G \frac{S_e}{S_a} \exp[-e(\phi_p - \phi_k)/kT_e] \quad (9)$$

dengan  $G = j_{e0} S_a / I_d$  adalah tetapan parameter lucutan yang nilainya bergantung pada jenis lucutan penghasil plasma.

Kerapatan arus elektron dari permukaan plasma ke anoda (grid)  $i_a$  dan kerapatan arus elektron dari anoda ke kolektor  $i_e$  dapat dituliskan sebagai

$$i_a = I_a / j_{e0} S_a = \exp[-e(\phi_p - \phi_a)/kT_e] \quad (10a)$$

$$i_e = I_e / j_{e0} S_e = \exp[-e(\phi_p - \phi_k)/kT_e] \quad (10b)$$

Substitusi persamaan (10a) dan (10b) ke persamaan (9) maka akan diperoleh persamaan

$$1 = G i_a + G \frac{S_e}{S_a} i_e \quad (11)$$

Persamaan (9) juga dapat dituliskan dalam bentuk lain sebagai berikut

$$1 = G \exp\left[-e(\varphi_p - \varphi_k)/kT_e\right] \left\{ \exp\left[-e(\varphi_k - \varphi_a)/kT_e\right] + \frac{S_e}{S_a} \right\} \quad (12)$$

Substitusi persamaan (10b) ke persamaan (12) maka diperoleh persamaan

$$1 = G i_e \left\{ \exp\left[-e(\varphi_k - \varphi_a)/kT_e\right] + \frac{S_e}{S_a} \right\} \quad (13)$$

atau kerapatan arus elektron dari anoda ke kolektor  $i_e$  dapat dituliskan sebagai

$$i_e = \frac{\exp[e(\varphi_k - \varphi_a)/kT]}{G \left\{ 1 + \frac{S_e}{S_a} \exp[e(\varphi_k - \varphi_a)/kT] \right\}} \quad (14)$$

$(\varphi_k - \varphi_a)$  adalah tegangan ekstraksi yang terpasang  $U_{eks}$  sehingga persamaan (14) dapat dituliskan sebagai

$$i_e = \frac{\exp[eU_{eks}/kT]}{G \left\{ 1 + \frac{S_e}{S_a} \exp[eU_{eks}/kT] \right\}} \quad (15)$$

Akhirnya arus total berkas elektron yang terekstraksi dari BGP dengan luas lubang emisi  $S_e$  dapat dituliskan sebagai

$$I_e = i_e j_{e0} S_e = j_{e0} S_e \frac{\exp[eU_{eks}/kT]}{G \left\{ 1 + \frac{S_e}{S_a} \exp[eU_{eks}/kT] \right\}} \quad (16)$$

Menurut persamaan (3) kalau tegangan ekstraksi  $U_{eks}$  terjadi saat potensial ekstraksi sama dengan potensial plasma ( $\varphi_k = \varphi_p$ ) maka arus berkas elektron dari plasma akan maksimum (jenuh) yakni  $I_e = j_{e0} S_e$ . Sehingga substitusi untuk  $I_e = j_{e0} S_e$  pada persamaan (16) yang selanjutnya dapat diperoleh persamaan

$$1 = \frac{\exp[eU_{eks}/kT]}{G \left\{ 1 + \frac{S_e}{S_a} \exp[eU_{eks}/kT] \right\}} \quad (17)$$

atau dapat dituliskan sebagai

$$\exp[eU_{eks}/kT] = \frac{G}{1 - G \frac{S_e}{S_a}} \quad (18)$$

Pada persamaan (18) di atas nilai ruas kiri adalah lebih besar nol ( $> 0$ ) maka nilai ruas kanan juga lebih

besar nol. Karena nilai parameter lucutan  $G$  adalah lebih besar nol ( $G > 0$ ) maka dapat disimpulkan bahwa persamaan

$$G \frac{S_e}{S_a} < 1 \quad (19)$$

Persamaan (19) di atas yang identik dengan persamaan (6) merupakan persyaratan yang harus dipenuhi untuk terjadinya ekstraksi elektron termal dari jendela emisi yang masuk pada daerah pemercepat elektron untuk dipercepat oleh tegangan ekstraksi  $U_{eks}$ . Dapat disimpulkan bahwa agar diperoleh arus ekstraksi/emisi elektron maksimum/jenuh/termal dari permukaan plasma maka persamaan (19) di atas harus dipenuhi dan tidak berlaku untuk kebalikannya yakni untuk  $G S_e/S_a > 1$ . Untuk keadaan  $G S_e/S_a > 1$  maka potensial kolektor  $\varphi_k$  tidak akan pernah mencapai dan melebihi nilai potensial plasma  $\varphi_p$ , sungguhpun penambahan potensial  $\varphi_k$  terus dilakukan dan diikuti dengan penambahan potensial  $\varphi_p$  namun selalu diperoleh nilai  $\varphi_k$  lebih kecil dari pada potensial  $\varphi_p$  ( $\varphi_k < \varphi_p$ ).

## KESIMPULAN

1. Arus ekstraksi elektron termal pada peralatan sistem SEKP hanya akan diperoleh kalau dipenuhi syarat  $G S_e/S_a < 1$ , dimana  $G$  adalah tetapan parameter lucutan plasma,  $S_e$  luas kolektor yang dikenai elektron termal (luas jendela emisi) dan  $S_a$  luas anoda yang dikenai elektron pada dinding BGP.
2. Atas dasar no. 1 telah diaplikasikan untuk penggunaan luas anoda  $S_a = 770,4 \text{ cm}^2$  dan luas jendela ekstraksi/emisi elektron  $S_e = 90 \text{ cm}^2$  pada system SEKP, dan telah terukur arus ekstraksi elektron termal senilai  $I_e = 34,3 \text{ A}$  (tegangan ekstraksi  $U_{eks} = 3 \text{ kV}$ , efisiensi ekstraksi  $\alpha = 25,9 \%$ )

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua rekan di litbang Sumber Elektron Katoda Plasma Bidang Fisika Partikel atas segala masukan dan saran selama dalam acara pertemuan/diskusi ilmiah rutin (seminggu sekali) serta kepada Kepala PSTA-BATAN yang telah membiayai penelitian ini melalui dana DIPA PSTA-BATAN Tahun Anggaran 2015.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Agus Purwadi, *Penentuan Arus Emisi Berkas Elektron Dan Parameter Plasma Pada Sumber Elektron Katoda Plasma*, Presentasi Ilmiah

- Peneliti Utama, Bidang Fisika Plasma, PSTA BATAN Yogyakarta, 21 Oktober 2014.
2. Wiryoadi, Bambang Siswanto, Agus Purwadi, Lely Susita R.M., Sudjtmoko, *Sistem Deteksi Spot Plasma Pada Elektoda Ignitor*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, ISSN 0216-3128, 26 Juni 2013, PTAPB-BATAN, hal. 66-74.
  3. Efim Oks, *Lecture 3 Basic Plasma Parameters*, presented in BATAN Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia (5<sup>th</sup> - 9<sup>th</sup> December 2011).
  4. Efim Oks, *Lecture 8 "DUET" Broad beam electron source*, presented in BATAN Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia (5<sup>th</sup> - 9<sup>th</sup> December 2011).
  5. Efim Oks, *Lecture 4 Mechanisms of plasma electron emission*, Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia (5<sup>th</sup> - 9<sup>th</sup> December 2011).
  6. Efim Oks, *Lecture 4 Electron emission from plasma*, Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia (5<sup>th</sup> - 9<sup>th</sup> December 2011).
  7. Agus Purwadi, *Emisi Elektron dan Penentuan Dimensi Bejana Generator Plasma untuk Perangkat Iradiator Elektron Pulsa*, Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIX HFI Jateng & DIY, Yogyakarta 25 April 2015, ISSN 0853-0823.
  8. Efim Oks, *Plasma Cathode Elektron Sources*, Physics, Technology, Applications, Institute of High Current Electronics (IHCE), Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademichisky Ave, 634055 Russia. Translated from Russian by Titiana, Cherkashina and Anna Korovina December, 2006.
  9. Efim Oks, *Lecture 4 Current balance*, Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia (5<sup>th</sup> - 9<sup>th</sup> December 2011).
  10. Sudjtmoko, *Uji Fungsi Perangkat Sistem Sumber Elektron Katoda Plasma Untuk Large Area E-Beam*, Usulan Kegiatan (Kerangka Acuan Kerja Tingkat Komponen) Tahun Anggaran 2014, PSTA BATAN Yogyakarta, 2014.
  11. Agus Purwadi, Bambang Siswanto, Wiryoadi, Lely Susita Rm, Sudjtmoko, *Konstruksi dan Uji Fungsi Sistem Duet Sumber Elektron Katoda Plasma*, Laporan Teknik, Kegiatan Penelitian di PSTA BATAN Yogyakarta, Tahun Anggaran 2014.

---

## TANYA JAWAB

### Silakhuddin

- Didalam plasma, selain elektron ada juga ion negatif. Didalam formulasi saya tidak melihat adanya kontribusi ion negatif yang terekstraksi, mohon penjelasan.

### Agus Purwadi

*Ion negatif dalam plasma sudah tereleminir dengan partikel positif yang lain. Oleh karenanya plasma didefinisikan sebagai quasi netral yang terdiri dari campuran ion, elektron, atom, molekul, radikal bebas yang peka terhadap medan listrik dan medan magnet, kerapatan ion ( $n_i$ ) dianggap sama dengan kerapatan elektron ( $n_e$ ). Formulasi disini khususnya untuk elektron bukan untuk ion, mengingat massa ion ( $1,67 \times 10^{27}$  kg) jauh lebih besar dari pada massa elektron ( $9,11 \times 10^{-31}$  kg) sehingga untuk kecepatan ion tidak menggunakan formulasi kecepatan relativistik.*