

KARAKTERISASI SPOT PLASMA PADA PERMUKAAN KATODA SISTEM ELEKTRODA IGNITOR

Lely Susita R.M., Sudjatmoko, Wirjoadi, Agus Purwadi

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6010 Ykbb, Yogyakarta 55281

E-mail: lelysusita@gmail.com

ABSTRAK

KARAKTERISASI SPOT PLASMA PADA PERMUKAAN KATODA SISTEM ELEKTRODA IGNITOR.

Telah dilakukan karakterisasi spot plasma yang terbentuk pada permukaan katoda magnesium melalui proses lucutan permukaan pada sistem elektroda ignitor. Sistem elektroda ignitor yang dipasang pada sisi kiri dan kanan bejana plasma berfungsi menginisiasi lucutan plasma, terdiri dari katoda, anoda dan isolator yang terpasang antara katoda dan anoda. Material katoda yang paling baik untuk sistem elektroda ignitor adalah magnesium karena mempunyai laju erosi paling rendah ($11,7 \mu\text{g}/\text{C}$) sehingga tidak mudah tererosi dan rusak, serta mempunyai energi kohesif yang rendah ($1,51 \text{ eV}$). Karakterisasi spot plasma pada permukaan katoda magnesium dilakukan menggunakan sistem catudaya lucutan ignitor (IDPS) dengan tegangan keluaran $13,2 \text{ kV}$ dan lebar pulsa $2 \mu\text{detik}$, dan dilengkapi dengan sistem deteksi terdiri dari probe pembagi tegangan dan koil Rogowski, diperoleh arus lucutan spot plasma pada permukaan katoda magnesium teknis $1,55 \text{ A}$, dan arus spot plasma pada katoda magnesium murni $3,09 \text{ A}$. Besarnya partikel tererosi untuk arus $I = 3,09 \text{ A}$ selama $t = 8 \mu\text{detik}$ untuk bahan magnesium dengan laju erosi $= 11,7 \mu\text{g}/\text{C}$ adalah $71,62 \times 10^{11}$ cacah. Dengan energi yang diperlukan dalam pembentukan spot plasma sebesar $1087,68 \times 10^6$ joule diperoleh suhu spot plasma sekitar $10,99 \times 10^6 \text{ K}$ atau $0,95 \text{ keV}$ dengan jari-jari spot plasma $1,243 \mu\text{m}$.

Kata kunci : Sistem elektroda, material elektroda, sumber elektron katoda plasma, spot plasma

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF PLASMA SPOTS ON THE CATHODE SURFACE OF THE IGNITER ELECTRODE SYSTEM.

Characterization of plasma spots formed on the surface of the magnesium cathode through the surface discharge process on the igniter electrode system has been done. Igniter electrode systems are mounted on either side of the plasma vessel serves to initiate the plasma discharge are consists of a cathode, an anode and insulator mounted between the cathode and anode. The best cathode material for the igniter electrode system is magnesium because it has the lowest rate of erosion ($11.7 \mu\text{g}/\text{C}$) that is not easily eroded and damaged, as well as having a low cohesive energy (1.51 eV). Characterization of plasma spots on the surface of the magnesium cathode performed using a system of igniter discharge power supply (IDPS) with output voltage 13.2 kV and pulse width $2 \mu\text{s}$, and equipped with a detection system consists of a voltage divider probe and Rogowski coil, it is obtained the discharge current of plasma spots on the surface of technical magnesium cathode 1.55 A , and the discharge current of plasma spots on the surface of pure magnesium 3.09 A . The amount of eroded particles for the current $I = 3.09 \text{ A}$ during $t = 8 \mu\text{s}$ for magnesium materials with the rate of erosion $= 11.7 \mu\text{g}/\text{C}$ is 71.62×10^{11} particles. With energy required for the formation of plasma spots in the amount of 1087.68×10^6 joules, obtained plasma spots temperature around $10.99 \times 10^6 \text{ K}$ or 0.95 keV with a plasma spots radius of $1.243 \mu\text{m}$.

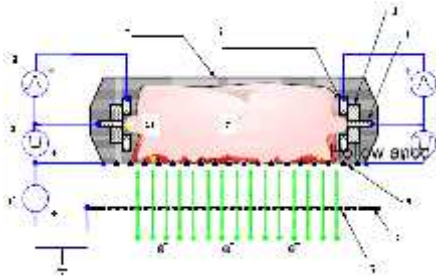
Keywords : electrode system, electrode material, plasma cathode electron source, plasma spots

PENDAHULUAN

Sistem elektroda yang dirancang untuk sumber elektron katoda plasma adalah suatu sistem yang berfungsi untuk menghasilkan plasma pulsa di dalam bejana plasma secara terkendali. Sistem elektroda terdiri dari dua sistem elektroda yaitu sistem elektroda ignitor dan sistem elektroda generator plasma. Sistem elektroda ignitor yang menginisiasi

lucutan terdiri dari dua buah elektroda ignitor yang dilengkapi dengan dua unit sistem sumber daya ignitor (IDPS) dan sistem deteksi arus spot plasma. Sistem elektroda ignitor terdiri dari katoda, anoda dan isolator antara katoda dan anoda. Sistem elektroda generator plasma sebagai pembentuk plasma dalam bejana plasma dilengkapi dengan dua unit sistem sumber daya generator plasma (ADPS) dan sistem deteksi arus lucutan dan kerapatan

plasma. Sistem elektroda generator plasma terdiri dari katoda yang juga sama dengan katoda elektroda ignitor dan anoda yang juga sebagai dinding bejana plasma^(1,3).



Gambar 1. Sistem elektroda sumber elektron katoda plasma

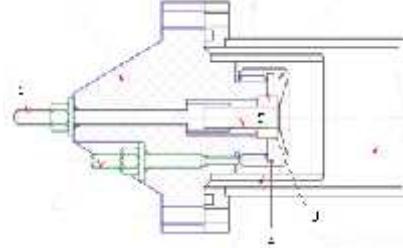
Keterangan gambar :

1. Bejana plasma yang juga disebut anoda berongga; 2. Anoda ignitor; 3. Isolator; 4. Katoda sebagai sumber spot plasma; 5. Grid ekstraktor elektron; 6. Pemegang jendela; 7. Jendela elektron dari bahan Ti/Be; 8. Sumber daya ignitor 10 kV, 100 mJ; 9. Sumber daya generator plasma; 10. Tegangan pemercepat elektron; 11. Spot plasma; 12. Plasma.

Sistem elektroda generator plasma, mempunyai dua sumber daya yaitu sumber daya ignitor (8) dan sumber daya generator plasma (9). Sumber daya ignitor (8) mempunyai spesifikasi tegangan 10 kV, dan energi 100 mJ mengalirkan tegangan melalui anoda (2) dan melalui isolator (3) akan membentuk spot plasma (11) di permukaan katoda (4) melalui proses lucutan permukaan, pada bejana plasma (1) dengan tekanan gas sekitar 10^{-4} Torr. Kemudian spot plasma (11) yang terbentuk akan dihamburkan oleh tegangan sumber daya generator plasma (9) dan hamburan spot plasma yang dipercepat tegangan sumber daya generator plasma akan mengionkan gas dalam rongga bejana plasma terbentuk lucutan busur plasma (12) di sekitar daerah anoda berongga (1), dan bila kedua sistem elektroda berjalan serempak maka keseluruhan ruang anoda akan terbentuk lucutan busur plasma. Oleh tegangan pemercepat (10) elektron yang lolos melalui grid (5) akan dipercepat sampai mampu menembus jendela Ti/Be (7) yang selanjutnya dimanfaatkan untuk iradiasi bahan⁽²⁾. Sistem yang dirancang ini diharapkan dapat memberikan arus berkas elektron 50 A dan dalam luasan keluaran $15 \times 60 \text{ cm}^2$.

Untuk bejana plasma dengan tekanan sekitar 10^{-4} Torr, berdasar aturan Paschen, tegangan dadal antara katoda dan anoda sangat besar (sekitar ratusan kV untuk jarak elektroda beberapa cm), oleh karena itu sistem elektroda ignitor mempunyai susunan seperti ditunjukkan pada Gambar 2⁽³⁾. Susunan elektroda ignitor yang utama terdiri dari katoda dari bahan kuningan (1), dan didepannya diberi penyambung dari bahan magnesium (2), kemudian isolator silinder teflon setebal 1 mm (3)

dan sebagai anoda dari bahan baja tahan karat (4). Bahan magnesium digunakan sebagai katoda, karena magnesium mempunyai sifat fisis laju erosi sebesar $11,7 \mu\text{g/C}$ (C coulomb) dan energi kohesif rendah sekitar $1,51 \text{ eV/atom}$ ^(4,5). Dengan demikian semakin besar arus menuju katoda akan semakin besar pula partikel magnesium tererosi atau semakin besar pula spot plasma yang dihasilkan.



Gambar 2. Susunan elektroda pembentuk spot plasma

Dalam lucutan permukaan ini silinder teflon (3) yang berada diantara katoda (2) dan anoda (4) berperilaku sebagai kapasitor yang menerima muatan dari sumber tegangan ignitor melalui anoda baja tahan karat⁽⁶⁾. Dalam selang waktu tertentu kapasitor teflon akan termuati penuh, dan oleh karena kapasitor teflon tersebut bertegangan 10 kV dan menempel erat dengan katoda magnesium maka ia akan melimpahkan seluruh energinya kepada katoda magnesium dan oleh tegangan muatan yang ada di kapasitor teflon yang sangat besar terjadilah lucutan spot di permukaan katoda.

Untuk menimbulkan spot plasma pada permukaan katoda ignitor, maka dibutuhkan tegangan sekitar 9-10 kV pulsa dengan energi sekitar 100 J, lebar pulsa 4 μdetik , dengan frekuensi pengulangan 50 Hz. Agar diperoleh spesifikasi teknis sesuai yang direncanakan, telah dilakukan konstruksi modul sistem elektroda ignitor serta kegiatan uji fungsi modul sistem elektroda ignitor. Dari hasil pengujian tahun 2012, pada saat anoda dikenakan tegangan pulsa cukup tinggi, maka ada aliran muatan melewati permukaan isolator, dan sampai di katoda terjadi lucutan percik yang berupa lingkaran kecil berwarna putih dalam lingkungan tekanan atmosfer. Lucutan ini disebut lucutan permukaan (*surface discharge*) sebagai pemicu terjadinya plasma dalam sistem elektroda generator plasma. Tetapi hasil pengujian lucutan percik di katoda yang juga biasa disebut spot plasma belum stabil. Untuk memperoleh spot plasma pada permukaan katoda yang stabil dengan intensitas cukup tinggi, akan dilakukan kegiatan uji fungsi modul sistem elektroda ignitor menggunakan material katoda magnesium karena mempunyai laju erosi ion i paling rendah ($11,7 \mu\text{g/C}$) sehingga tidak mudah rusak (tererosi), serta mempunyai energi kohesif yang rendah ($1,51 \text{ eV}$) untuk menginisiasi terbentuknya plasma dalam bejana plasma.

TATA KERJA

Untuk menimbulkan spot plasma pada katoda magnesium, maka dibutuhkan tegangan sekitar 9-10 kV pulsa dengan energi sekitar 100 J. Sumber daya *ignitor* (pemicu) penimbul spot plasma pada katoda magnesium dengan tegangan keluaran 10 kV dan lebar pulsa 4 μ detik, dengan frekuensi pengulangan 50 Hz, dapat disusun dengan rangkaian seperti yang ditunjukkan Gambar 3.

Gambar 3 menunjukkan 2 blok rangkaian, blok pertama adalah rangkaian SCR sebagai penguat tegangan dan daya dari pulsa UJT dan blok kedua berupa trafo *step-up* yang memperbesar tegangan keluaran dari SCR.

Karakterisasi spot plasma pada permukaan katoda ignitor dapat dilakukan apabila masing-masing modul pada sistem sumber elektron katoda plasma serta sistem deteksi yang terdiri dari sistem elektroda ignitor, sistem sumber daya ignitor, probe pembagi tegangan, koil Rogowski dan osiloskop dapat dioperasikan secara optimum.

Pengukuran tegangan keluaran sumber daya ignitor pembentuk spot plasma menggunakan probe pembagi tegangan, dimana hasil pengukuran tegangan diturunkan 1000 kali yaitu dengan menggunakan resistor pembagi tegangan 50M /50k, sedangkan arus spot plasma dapat ditentukan dengan menggunakan koil Rogowski. Koil Rogowski mempunyai prinsip kerja menangkap medan magnet di dalam ruang di sekitar konduktor yang dialiri arus. Tegangan keluaran koil dirumuskan sebagai laju perubahan fluks magnet ⁽⁷⁾.

$$V_{\text{keluaran koil}} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\sim_0 n A}{2f r} \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

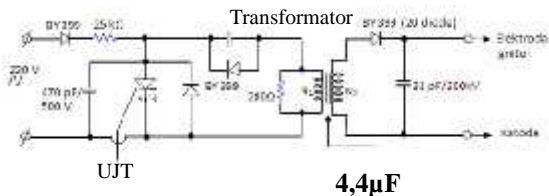
Dengan demikian dapat diketahui bahwa tegangan keluaran koil Rogowski tergantung pada besarnya perubahan arus per satuan waktu, jumlah lilitan, luas permukaan koil dan jarak dari sumbu arus.

Terlihat pada persamaan (1) bahwa tegangan keluaran koil sebanding dengan perubahan arus $\frac{dI}{dt}$, sehingga untuk menentukan besarnya arus I(t) maka

tegangan keluaran koil harus diintegrasikan. Dalam eksperimen, tegangan keluaran koil dikenakan rangkaian integrator RC pada koil, sehingga besarnya arus dapat ditentukan menurut persamaan

$$I(t) = \frac{2f r R C}{\sim n A} V(t) \quad (2)$$

dimana I(t) : arus spot plasma, R : resistansi integrator, C : kapasitan integrator, V(t) : tegangan terukur.



Gambar 3. Rangkaian sistem sumber daya ignitor (IDPS)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk karakterisasi spot plasma yang terbentuk di permukaan katoda magnesium melalui proses lucutan permukaan pada bejana anoda berongga, dilengkapi dengan modul IDPS, sistem elektroda ignitor, sistem vakum dan sistem deteksi menjadi satu unit sumber elektron katoda plasma (SEKP). Bejana anoda berongga yang berada di dalam bejana vakum SEKP, terbuat dari bahan stainless-steel bentuk silinder dengan diameter 4,0 cm dan panjang 48,75 cm. Pada sisi kiri dan kanan bejana anoda berongga diletakkan sistem elektroda ignitor, yang terdiri dari sebuah katoda dengan spesifikasi: material katoda jenis Mg (magnesium) berbentuk batang diameter 6 mm dan panjang 20 mm; sebuah anoda dengan material anoda SS 304 non magnetik berbentuk silinder dengan diameter luar 28 mm, diameter dalam 7,5 mm dan tebal 14 mm; material isolator antara katoda dan anoda terbuat dari teflon berbentuk silinder, diameter dalam 6 mm, diameter luar 12,5 mm dan panjang 6 mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



(a)



(b)

Gambar 4. (a) Komponen sistem elektroda ignitor, dan (b) komponen sistem elektroda ignitor yang telah dirangkai menjadi satu modul sistem elektroda ignitor

Pada sistem elektroda ignitor, bila pada anoda dikenakan tegangan pulsa cukup tinggi, maka ada aliran muatan melewati permukaan isolator, dan sampai di katoda terjadi lucutan percik melalui proses lucutan permukaan (*surface discharge*) pada bejana plasma. Lucutan percik di katoda yang juga biasa disebut spot plasma mempunyai ukuran mikrometer dan berintensitas cukup tinggi yang kemudian bergerak di atas permukaan elektroda. Parameter dari spot plasma di katoda adalah laju erosi ion (*ion erosion rate*), yang tergantung pada material katoda dan umumnya lebih besar untuk unsur dengan energi kohesif rendah. Oleh karena itu, material katoda untuk sistem elektroda ignitor paling baik menggunakan material Mg karena mempunyai laju erosi ion γ_i paling rendah ($11,7 \mu\text{g/C}$) sehingga tidak mudah rusak atau tererosi, serta mempunyai energi kohesif yang rendah (pada energi 1,51 eV telah terbentuk plasma). Gambar 5 menampilkan hasil pengujian timbulnya spot plasma sebagai pemicu terjadinya plasma dalam sistem elektroda generator plasma. Pada gambar tersebut telah terjadi spot plasma pada permukaan katoda yang berupa lingkaran kecil berwarna putih dalam lingkungan tekanan atmosfer.



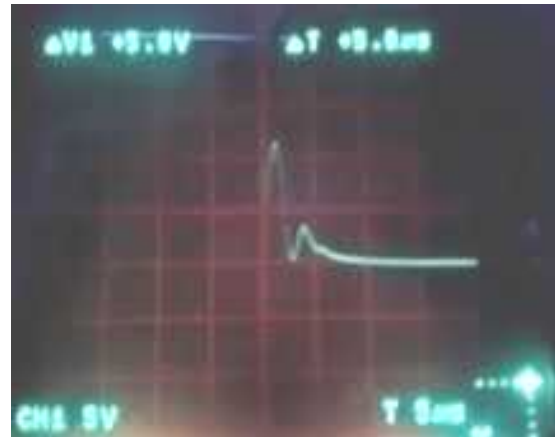
Gambar 5. Pengujian timbulnya spot plasma sebagai pemicu terjadinya plasma, telah terjadi spot plasma pada permukaan katoda yang berupa lingkaran kecil berwarna putih.

Dengan menggunakan rangkaian sumber daya ignitor (IDPS) yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan dilengkapi dengan probe pembagi tegangan, diperoleh hasil pengujian sistem IDPS dengan lebar pulsa 2 μdetik dan tegangan keluaran sistem IDPS 13,2 kV (ditunjukkan pada Gambar 6). Pada pengujian spot plasma dengan menggunakan koil Rogowski pada permukaan katoda (bahan Mg teknis buatan bengkel) melalui proses lucutan permukaan pada tekanan udara sekitar 10^{-4} Torr diperoleh lebar pulsa spot plasma 25 μdetik dan tegangan terukur sebesar 0,5 volt (Gambar 7). Untuk menghitung

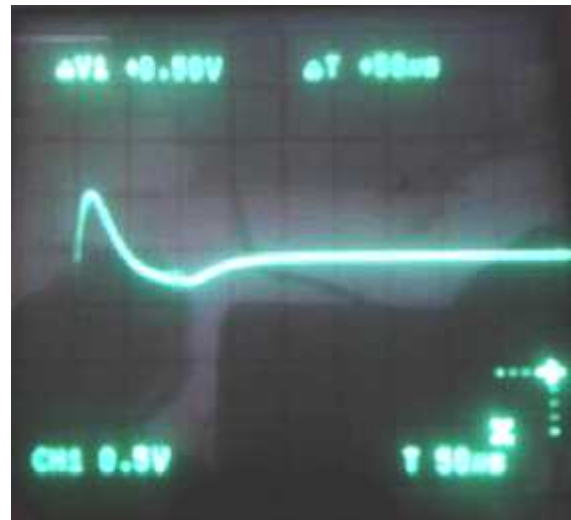
besarnya arus spot plasma dapat digunakan persamaan:

$$I(t) = \frac{2f r R C}{-n A} V(t) \quad (2)$$

dimana $R = 100$ adalah resistansi integrator, $C = 0,33 \mu\text{F}$ adalah kapasitan integrator. Koil Rogowski yang dibuat menggunakan *core ferrite* dengan nilai permeabilitas bahan μ sekitar 1168,67 H/m, jumlah lilitan $n = 80$, luas permukaan koil $A = 75,68 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ dan jarak dari pusat koil Rogowski $r = 10,56 \times 10^{-3} \text{ m}$. Dengan menggunakan persamaan tersebut dapat ditentukan besarnya arus spot plasma $I = 1.55 \text{ A}$.

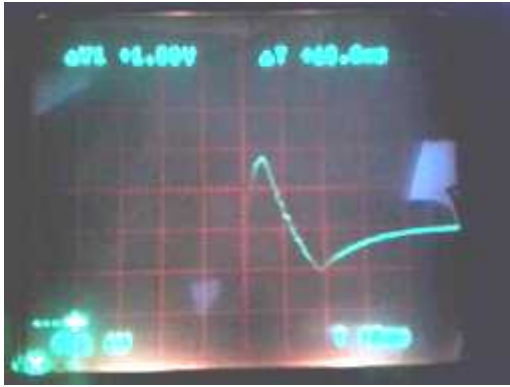


Gambar 6. Pulsa tegangan keluaran sistem IDPS



Gambar 7. Pulsa spot plasma pada permukaan katoda Mg teknis

Untuk memperoleh arus spot plasma sesuai dengan yang direncanakan, telah dilakukan penyempurnaan geometri sistem elektroda ignitor dengan menggunakan material Mg murni (dari *good fellow*). Hasil pengujian spot plasma pada permukaan katoda ignitor menggunakan Mg murni, diperoleh lebar pulsa 8 μdetik , tegangan puncak terukur sekitar 1 volt, dan hasil perhitungan arus spot plasma adalah 3,09 A (Gambar 8).



Gambar 8. Pulsa spot plasma pada permukaan katoda Mg murni

Semakin besar arus menuju katoda maka semakin besar spot plasma yang dihasilkan sehingga semakin besar pula partikel magnesium tererosi. Besarnya partikel tererosi untuk arus $I = 3,09$ A selama $t = 8$ μ detik untuk bahan magnesium dengan $= 11,7$ μ gram/C adalah,

$$m_{\text{erosi}} = \lambda Q = \lambda I t = 11,7 \times 10^{-6} \times 3,09 \times 8 \times 10^{-6} \\ = 289,224 \times 10^{-12} \text{ gram} \quad (3)$$

Untuk berat atom Mg = 24.31 gram/mol, maka cacah partikel magnesium yang mengalami erosi N_{erosi} sebesar

$$N_{\text{erosi}} = \frac{289,224 \times 10^{-12}}{24,31} \times 6,02 \times 10^{23} \\ = 71,622 \times 10^{11} \text{ partikel} \quad (4)$$

dan jari-jari spot plasma yang terbentuk pada permukaan katoda magnesium adalah $1,243 \mu\text{m}$.⁽²⁾

Dari hasil pengujian sistem IDPS dengan menggunakan probe pembagi tegangan, dimana hasil pengukuran diturunkan 1000 kali, diperoleh tegangan keluaran rata-rata IDPS dengan beban (pada saat terbentuk spot plasma) sebesar 440 volt, maka energi yang diperlukan untuk membentuk spot plasma adalah

$$E = V I t = 440 \times 3,09 \times 8 \times 10^{-6} \\ = 10876,8 \times 10^{-6} \text{ joule} \quad (5)$$

Apabila diasumsikan hanya 10% jumlah partikel yang tererosi membentuk spot plasma, maka besar energi spot plasma adalah

$$E = 0,1 \times 10876,8 \times 10^{-6} \\ = 1087,68 \times 10^{-6} \text{ joule} \quad (6)$$

Suhu spot plasma pada katoda dengan jari-jari $1,243$ μm dapat dihitung menggunakan persamaan

$$E = N k T \quad (7)$$

k adalah tetapan Boltzmann = $1,3807 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

Suhu spot plasma adalah

$$T = \frac{1087,68 \times 10^{-6}}{71,62 \times 10^{11} \times 1,3807 \times 10^{-23}} \\ = 10,999 \times 10^6 \text{ K} \approx 0,95 \text{ keV} \quad (8)$$

KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian spot plasma pada permukaan katoda magnesium menggunakan rangkaian sumber daya ignitor (IDPS) dengan tegangan 13,2 kV dan lebar pulsa 2 μ detik, yang dilengkapi dengan sistem deteksi yang terdiri dari probe pembagi tegangan dan koil Rogowski, diperoleh arus lucutan spot plasma pada permukaan katoda magnesium teknis 1,55 A, dan arus spot plasma pada katoda magnesium murni 3,09 A. Besarnya partikel tererosi untuk arus $I = 3,09$ A selama $t = 8$ μ detik untuk bahan magnesium dengan laju erosi $= 11,7$ μ gram/C adalah $71,62 \times 10^{11}$ partikel. Untuk energi yang diperlukan untuk membentuk spot plasma sebesar $1087,68 \times 10^{-6}$ joule diperoleh suhu spot plasma sekitar $10,99 \times 10^6$ K atau 0,95 keV dengan jari-jari spot plasma $1,243$ μm .

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh peneliti dan pembantu peneliti kegiatan rancangbangun sumber elektron katoda plasma, khususnya kepada Bapak Widdi Usada, Bapak Bambang Siswanto, Bapak Aminus Salam, Bapak Heri Sudarmanto, Bapak Untung Margono, dan saudara Ihwanul Aziz atas bantuan baik teori maupun teknis sehingga pelaksanaan kegiatan karakterisasi sistem IDPS dan spot plasma dapat terlaksana dengan baik, sehingga penulisan makalah ini dapat terwujud.

DAFTAR PUSTAKA

1. Sudjatmoko, (2012), *Rancang Bangun Sumber Elektron Katoda Plasma*, Proposal Program Insentif Proliptek.
2. Widdi Usada, Agus Purwadi, Lely Susita, (2012), *Karakteristik Spot Plasma Pada Lucutan Busur Plasma*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Pustek Akselerator dan Proses Bahan - BATAN, Yogyakarta.
3. Efim Oks, (2011), Lecture 8 : *Introduction of Plasma Cathode Electron Source*, presented in BATAN Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia.
4. Mohamed Ali Hassouba, F. Fahmy Elakshar and A. Abuwali Garamoon, (2002), *Measurements of The Breakdown Potentials for*

5. *Different Cathode Materials in The Townsend Discharge*, FIZIKA A 11: 81-90, Egypt.
6. K.P. Savkin, (2005), *Measurements of Ion Erosion Rate of Cathode Material in a Vacuum Arc Discharge*, Intense Electron and Ion Beams.
7. V F Puchkarev and M B Bochkarev, (1994), *Cathode spot initiation under plasma*, J. Phys. D: Appl, Phys. 27: 1214-1219.
8. Huddlestone, RH., and Leonard, SN.,(1995), *Plasma Diagnostic Techniques*, Academic Press, New York, p. 113-117

TANYA JAWAB**Dewita**

- Penurunan menjadi 1Hz dengan apa karena inputnya sudah 50 Hz?

Lely Susita

- Frekuensi pengulangan spot plasma dapat diatur dari 1 Hz hingga 50 Hz dengan menggunakan osilator (UJT) pada rangkaian sistem sumber daya ignitor (IDPS).