

PENENTUAN MASSA TEREROSI UNTUK BERBAGAI MATERIAL KATODA IGNITOR

DETERMINATION OF THE ERODED MASS FOR VARIOUS IGNITOR CATHODE MATERIALS

Lely Susita, Anjar Anggraini H., Ihwanul Aziz
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6010 ykbb, Yogyakarta 55281
e-mail: susita@batan.go.id

Diterima 9 September 2016, diterima dalam bentuk perbaikan 14 Oktober 2017, disetujui 25 Oktober 2017

ABSTRAK

PENENTUAN MASSA TEREROSI UNTUK BERBAGAI MATERIAL KATODA IGNITOR. Sistem elektroda ignitor yang berfungsi menginisiasi lucutan plasma terdiri dari dua buah elektroda ignitor yang dilengkapi dengan satu unit sistem catudaya lucutan ignitor (Ignitor Discharge Power Supply) dengan 2 trafo flyback, dimana inti ferit flyback masing-masing berdiameter 1,3 cm dan 1,5 cm sehingga diperoleh arus spot plasma yang berbeda untuk kedua sistem elektroda ignitor. Arus spot plasma tergantung pada jenis material katoda. Semakin besar arus menuju katoda maka semakin besar spot plasma yang dihasilkan sehingga semakin besar pula material katoda yang tererosi. Dalam penelitian ini dilakukan uji fungsi sistem elektroda ignitor, dan dari hasil uji fungsi dapat ditentukan besarnya massa dan partikel material katoda ignitor yang tererosi untuk menentukan umur katoda akibat hilangnya bahan di permukaan katoda setelah terbentuk spot plasma. Hasil pengujian spot plasma pada permukaan katoda ignitor menggunakan material Ag, Al, Cd dan Cu masing-masing diperoleh arus spot plasma 14,32 A, 12,34 A, 12,56 A dan 10,58 A dan lebar pulsa 22 μ s, 39 μ s, 38 μ s, dan 34 μ s. Material katoda yang baik untuk sistem elektroda ignitor adalah magnesium maupun aluminium karena mempunyai laju erosi γ rendah (11,7 μ g/C dan 14 μ g/C) sehingga tidak mudah tererosi dan rusak. Dari hasil pengujian spot plasma serta hasil perhitungan diperoleh massa katoda tererosi untuk material Al yang paling rendah yaitu 6,74 nano gram dan katoda berkurang sepanjang 88,26 μ m, sedangkan massa katoda tererosi paling tinggi adalah Cd (laju erosi 43,9 μ g/C) sebesar 20,95 nano gram, dimana katoda berkurang sepanjang 85,67 μ m.

Kata kunci: Sistem elektroda ignitor, sistem catudaya lucutan ignitor, spot plasma, umur katoda

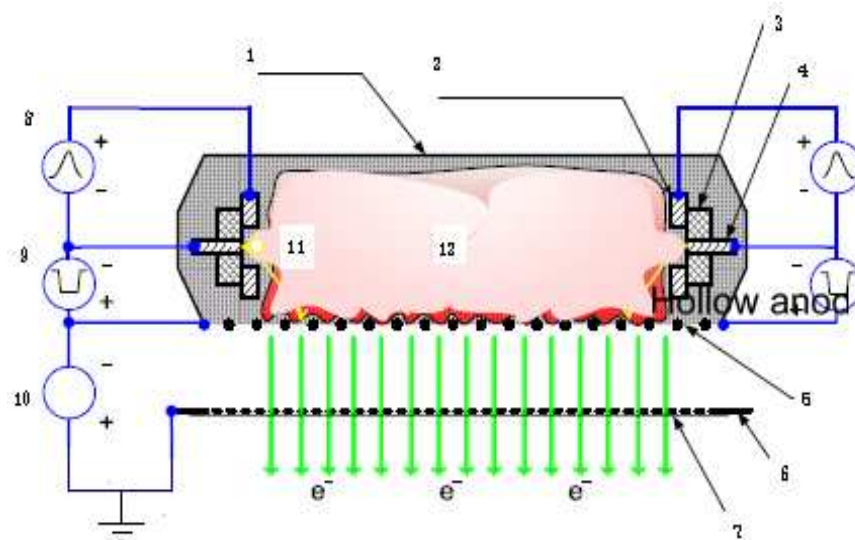
ABSTRACT

DETERMINATION OF THE ERODED MASS FOR VARIOUS IGNITOR CATHODE MATERIALS. Ignitor electrode system has a function of initiating plasma discharge, it consists of two ignitor electrodes complete with one unit of ignitor discharge power supply with 2 flyback transformer, flyback ferrite core of 1,3 cm and 1,5 cm respectively in diameter, furthermore it can be obtained different plasma currents spot for both ignitor electrode systems. Plasma spot current depends on the type of cathode material. The greater of current flows toward the cathode, the greater of plasma spot is generated, so that the eroded cathode material is getting greater too. In this study, the function test of ignitor electrode system has been conducted, from the results of function test can be determined the mass and the particle size of the ignitor cathode material eroded, and can be correlated to lifetime of cathode due to the loss of material at the surface of the cathode after forming plasma spot. The test results of plasma spot on the surface of ignitor cathode using the Ag, Al, Cd and Cu materials, respectively are obtained from plasma spot currents of 14,32 A, 12,34 A, 12,56 A and 10,58 A and the pulse width of 22 μ s, 39 μ s, 38 μ s and 34 μ s. The good cathode material for the ignitor electrode system is magnesium and aluminium because they have the low erosion rate γ (11.7 μ g/C and 14 μ g/C), furthermore they are not easily eroded and damaged. From the results of function test of plasma spot obtained the lowest eroded cathode mass is Al i.e. 6.74 nano grams and the cathode will be reduced along 88.26 μ m, while the highest of eroded cathode mass is Cd (erosion rate of 43.9 μ g/C) of 20.95 nanograms, the cathode will decrease along 85.67 μ m.

Keywords: Ignitor electrode system, ignitor discharge power supply system, plasma spot, cathode age

PENDAHULUAN

Teknologi sumber elektron berbasis ekstraksi elektron dari plasma untuk berbagai aplikasi telah berkembang dengan pesat. Berkaitan dengan peranan sebagai sumber iradiasi permukaan bahan, dan selaras dengan program institusi dalam mendukung penggunaan mesin berkas elektron (MBE) untuk iradiasi lateks, maka dikembangkan MBE jenis pulsa dengan sistem Sumber Elektron Katoda Plasma (SEKP) yang dapat menghasilkan berkas elektron berluasan lebar. MBE pulsa terdiri dari bejana sumber elektron yang dilengkapi dengan *electron window*, sistem SEKP, sistem tegangan pemercepat dan sistem vakum [1,2].



Gambar 1. Sistem sumber elektron katoda plasma (SEKP) model dua elektroda/DUET [2].

Sumber elektron katoda plasma terdiri dari dua sistem elektroda penghasil plasma di sebelah kiri dan kanan, sistem tersebut ditunjukkan 2, 3 dan 4 pada Gambar 1. Sistem elektroda pembentuk plasma, mempunyai dua sumber daya yaitu 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 oleh 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. Sistem yang dirancang ini diharapkan dapat memberikan arus berkas elektron 50 A dan dalam luasan keluaran $15 \times 60 \text{ cm}^2$.

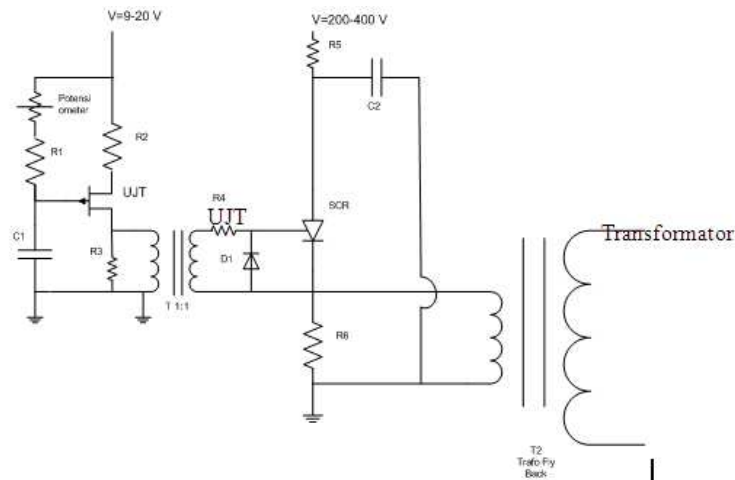
Spot plasma yang merupakan lontaran partikel permukaan dapat mengakibatkan kerusakan atau *scratch* pada katoda yang pada umumnya disebut kawah atau *crater*, dan besarnya *spot* terbentuk sebagai fungsi arus. *Spot* ini muncul pada suhu yang cukup tinggi sehingga terdeteksi arus dari elektroda ke gas dapat dijelaskan dengan proses emisi termionik. Mekanisme emisi termionik muncul bila medan cukup besar untuk mengekstrak elektron dari katoda. Teori emisi medan didasarkan pada pengandaian bahwa banyaknya butir-butir halus terlontar dari permukaan katoda, yang memiliki bentuk silinder dengan permukaan datar yang dapat menghasilkan pengandaian medan sampai seratus kali. Medan yang besar ini menghasilkan tegangan yang disebabkan oleh adanya muatan ruang di daerah katoda dapat menghasilkan arus emisi medan yang sangat besar. Muatan ruang ini mempunyai peran menurunkan fungsi kerja bahan katoda [3].

Untuk menimbulkan *spot* plasma pada permukaan katoda ignitor, dibutuhkan tegangan sekitar 9-10 kV pulsa dengan energi sekitar 100 J, lebar pulsa 4 μ detik, dengan frekuensi pengulangan 30 Hz. Agar diperoleh spesifikasi

teknis sesuai yang direncanakan, telah dilakukan konstruksi modul sistem elektroda ignitor serta kegiatan uji fungsi modul sistem elektroda ignitor menggunakan berbagai material katoda (Ag, Al, Cd, dan Cu). Berdasarkan hasil konstruksi tersebut dilakukan uji fungsi dan dilanjutkan dengan analisis hasil uji fungsi sistem elektroda ignitor untuk menentukan arus spot plasma serta penentuan massa tererosi material katoda.

TATA KERJA

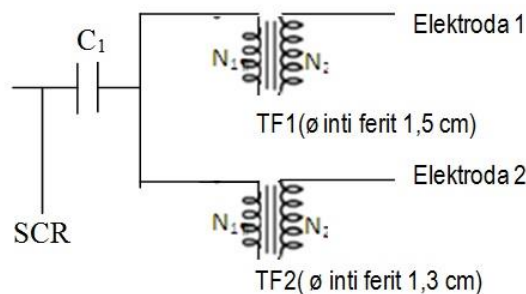
Sumber daya ignitor (IDPS) penimbul spot plasma pada katoda ignitor dengan tegangan keluaran sekitar 10 kV dan lebar pulsa 4 μ detik, dengan frekuensi pengulangan 30 Hz, dapat disusun dengan rangkaian seperti yang ditunjukkan Gambar 3 [4]. Pada Gambar 3 terlihat 3 blok rangkaian, blok pertama rangkaian UJT adalah rangkaian yang memberikan pulsa tegangan rendah, yang frekuensi pulsanya dapat diatur dengan mengatur R_1 dan $R_{potensio}$ serta C_1 , blok kedua adalah rangkaian SCR sebagai penguat tegangan dan daya dari pulsa UJT, dan blok ketiga berupa trafo *step-up* yang memperbesar tegangan keluaran dari SCR.



Gambar 2. Rangkaian sistem sumber daya ignitor (IDPS).

Pada Gambar 2 menunjukkan 3 blok rangkaian, blok pertama rangkaian UJT adalah rangkaian yang memberikan pulsa tegangan rendah, yang frekuensi pulsanya dapat diatur dengan mengatur R_1 dan $R_{potensio}$ serta C_1 , blok kedua adalah rangkaian SCR sebagai penguat tegangan dan daya dari pulsa UJT, dan blok ketiga berupa trafo *step-up* yang memperbesar tegangan keluaran dari SCR.

Pengujian spot plasma sistem DUET pada kedua permukaan katoda menggunakan 1 unit IDPS dengan 2 trafo *flyback* dimana inti ferit *flyback* masing-masing berdiameter 1,3 cm dan 1,5 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4 [5].



Gambar 3. Rangkaian sistem sumber daya ignitor (IDPS) sistem DUET.

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 50 M Ω /50 k Ω , 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 [6,7].

$$V_{\text{keluaran koil}} = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 n A}{2\pi r} \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

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

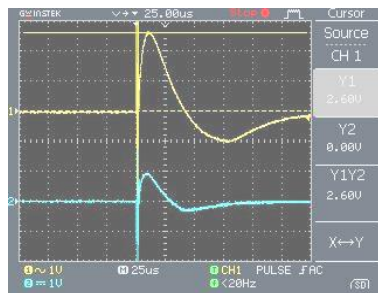
$$I(t) = \frac{2\pi r RC}{\mu n A} V(t) \quad (2)$$

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

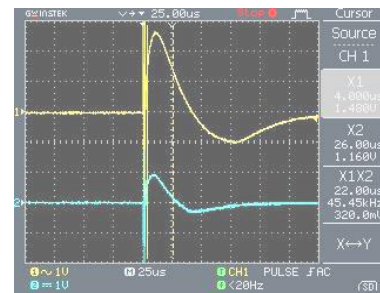
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda melalui proses lucutan permukaan pada tekanan udara sekitar 10^{-4} Torr untuk berbagai bahan katoda dengan menggunakan koil Rogowski ditunjukkan pada Gambar 4-7 yang merupakan tampilan dari osiloskop dimana sumbu vertikal merupakan fungsi dari tegangan dan sumbu horizontal fungsi dari skala lebar pulsa.

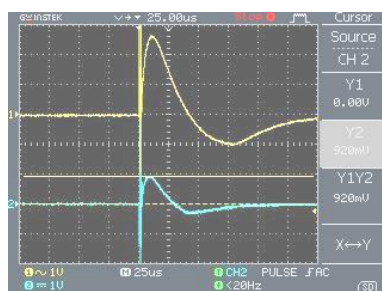
Material Katoda: Perak (Ag)



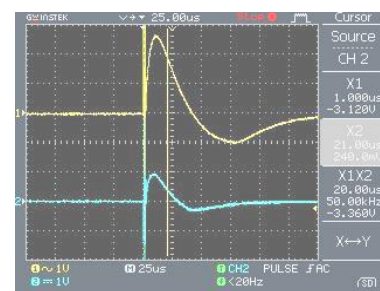
Gambar 4a. Tegangan spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 1 ($V=2,60$ V).



Gambar 4b. Lebar pulsa spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 1 ($\tau=22$ μ s).

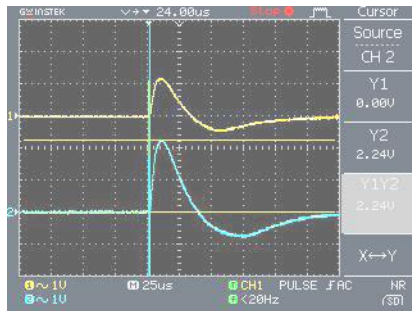


Gambar 4c. Tegangan spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($V = 0,92$).

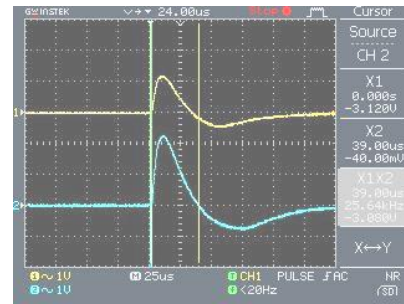


Gambar 4d. Lebar pulsa spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($\tau = 20$ μ s).

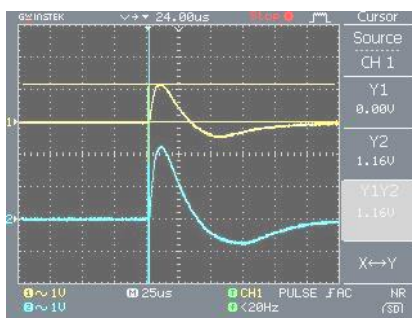
Material Katoda: Aluminium (Al)



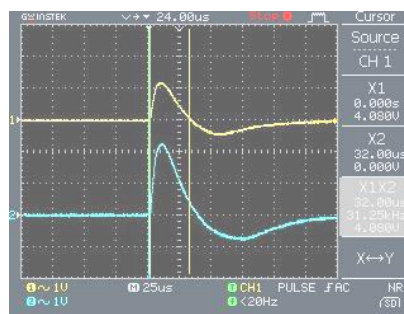
Gambar 5a. Tegangan spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 1 ($V = 2,24$ V).



Gambar 5b. Lebar pulsa spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 1 ($\tau = 39$ µs).

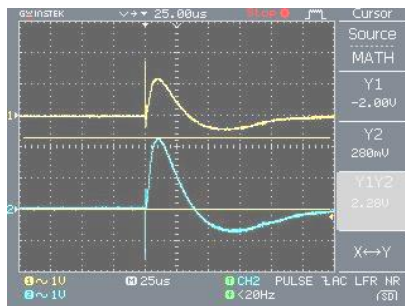


Gambar 5c. Tegangan spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($V = 1,16$ V).

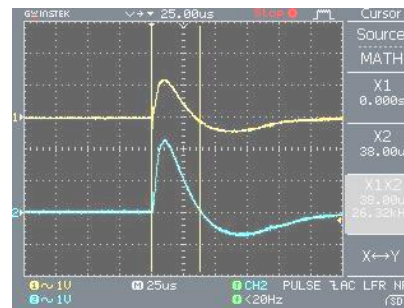


Gambar 5d. Lebar pulsa spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($\tau = 32$ µs).

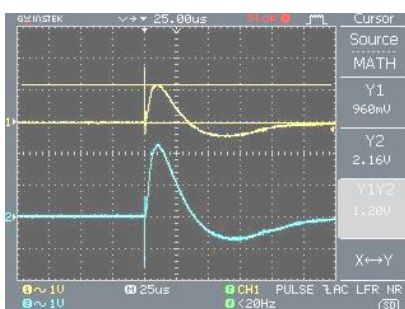
Material Katoda: Kadmium (Cd)



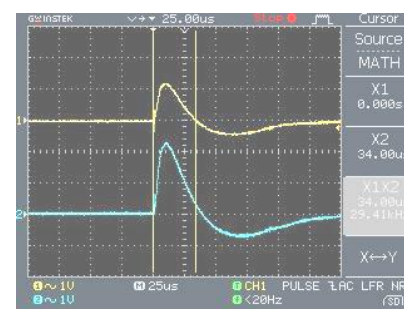
Gambar 6a. Tegangan spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 1 ($V = 2,28$ V).



Gambar 6b. Lebar pulsa spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 1 ($\tau = 38$ µs).

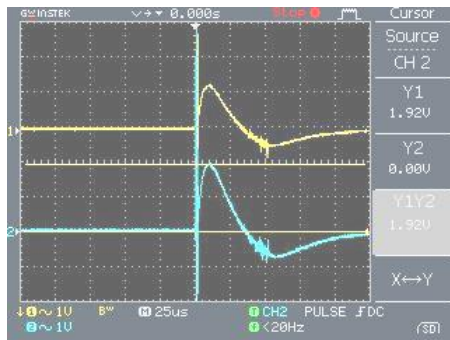


Gambar 6c. Tegangan spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($V = 1,20$ V).

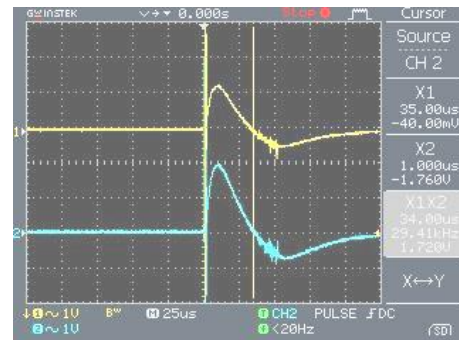


Gambar 6d. Lebar pulsa spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($\tau = 34$ µs).

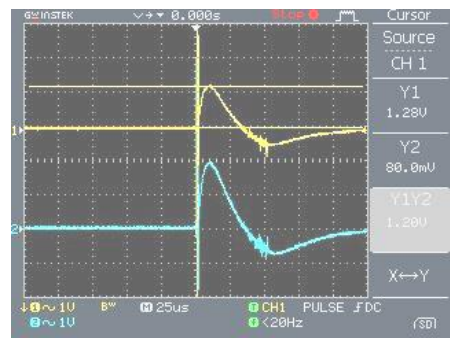
Material Katoda: Tembaga (Cu)



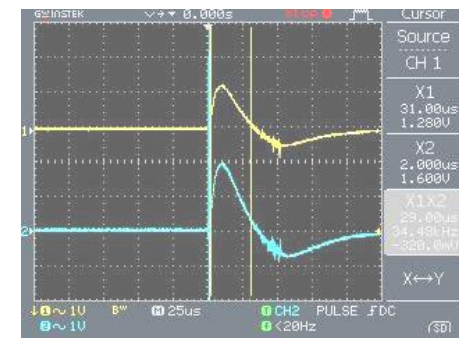
Gambar 7a. Tegangan spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($V = 1,92 \text{ V}$).



Gambar 7b. Lebar pulsa spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($\tau = 34 \mu\text{s}$).



Gambar 7c. Tegangan spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($V = 1,20 \text{ V}$).



Gambar 7d. Lebar pulsa spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda 2 ($\tau = 29 \mu\text{s}$).

Untuk menghitung besarnya arus spot plasma dapat digunakan persamaan (2) di atas, dimana $R = 100 \Omega$ 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 $1017,36 \text{ H/m}$, jumlah lilitan $n = 76$, luas permukaan koil $A = 45 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ dan jarak dari pusat koil Rogowski $r = 9,25 \times 10^{-3} \text{ m}$. Dengan menggunakan persamaan tersebut dapat ditentukan besarnya arus spot plasma untuk berbagai bahan katoda yang diperoleh pada pengujian spot plasma sistem DUET (ditunjukkan pada Tabel 1).

Tabel 1. Arus spot plasma untuk berbagai bahan katoda.

No	Material Katoda	Spot Plasma Elektroda 1 (diameter trafo flyback 1,5 cm)			Spot Plasma Elektroda 2 (diameter trafo flyback 1,3 cm)		
		V(V)	$\tau(\mu\text{det})$	I(A)	V(V)	$\tau(\mu\text{det})$	I(A)
1	Ag	2,60	22	14,32	0,92	20	5,07
2	Al	2,24	39	12,34	1,16	32	6,39
3	Cd	2,28	38	12,56	1,20	34	6,61
4	Cu	1,92	34	10,58	1,20	29	6,61

Arus spot plasma tergantung pada jenis material katoda. Hal ini dapat dikaitkan dengan perbedaan energi kohesif dari material katoda. Arus spot plasma umumnya lebih besar untuk material katoda dengan energi kohesif rendah. Parameter dari spot plasma adalah laju erosi ion (*ion erosion rate*), sedangkan laju erosi ion merupakan

karakteristik dari bahan katoda [8-11]. Semakin besar arus menuju katoda maka semakin besar spot plasma yang dihasilkan sehingga semakin besar pula material katoda yang tererosi [12-15].

Apabila selama N kali lucutan dari IDPS yang membentuk spot, material katoda berkurang sepanjang dX , maka massa material yang berkurang sepanjang dX , mengikuti persamaan

$$M_{erosi} = \rho \pi r^2 dX \quad (3)$$

ρ adalah rapat massa material katoda, r jari-jari katoda dan dX adalah pengurangan bahan. Massa tererosi ini sama dengan jumlah N kali lucutan spot IDPS dikalikan dengan massa tererosi setiap lucutan IDPS, atau dirumuskan

$$M_{erosi} = N m_{erosi \text{ setiap lucutan}} \quad (4)$$

$$m_{erosi \text{ setiap lucutan}} = \gamma I \tau \quad (5)$$

Dari hasil pengujian spot plasma sistem DUET pada permukaan katoda dengan menggunakan koil rogowski, diperoleh arus dan lebar pulsa spot plasma, dan dengan menggunakan persamaan (3), (4), dan (5) dapat dilakukan perhitungan besarnya massa katoda yang tererosi, dan pengurangan katoda untuk berbagai bahan katoda. Hasil perhitungan ini ditampilkan pada Tabel 2, dan dari data-data tersebut dapat digunakan untuk memprediksi umur katoda akibat hilangnya bahan di permukaan katoda setelah terbentuk spot plasma.

Tabel 2. Massa katoda tererosi.

No	Material Katoda	I (A)	τ (μ det)	γ_i (μ g/C)	m_{erosi} (ng)	dx (μ m)
1	Ag	14,32	22	27,8	8,76	29,50
2	Al	12,34	39	14	6,74	88,26
3	Cd	12,56	38	43,9	20,95	85,67
4	Cu	10,58	34	19,3	6,94	27,40

Berdasarkan tabel 2 material katoda paling baik untuk sistem elektroda ignitor adalah aluminium karena mempunyai laju erosi γ paling rendah (14 μ g/C) sehingga tidak mudah tererosi dan rusak. Dari hasil pengujian spot plasma diperoleh massa katoda tererosi untuk material Al yang paling rendah yaitu 6,74 nano gram, dan katoda berkurang sepanjang 88,26 μ m, sedangkan massa katoda tererosi paling tinggi adalah Cd (laju erosi 43,9 μ g/C) sebesar 20,95 nano gram, dimana katoda berkurang sepanjang 85,67 μ m.

Magnesium digunakan sebagai elektroda karena mempunyai laju erosi γ 11,7 μ g/C dengan pengurangan katoda sepanjang 17,64 μ m^[5], dalam hal ini cukup kompetitif dibandingkan dengan elektroda menggunakan bahan aluminium. Jadi material Mg maupun Al cukup baik untuk digunakan sebagai elektroda dalam sumber elektron katoda plasma.

KESIMPULAN

Pengujian spot plasma sistem DUET pada kedua permukaan katoda untuk berbagai bahan katoda menggunakan 1 unit IDPS dengan 2 trafo *flyback*, dimana inti ferit *flyback* masing-masing berdiameter 1,3 cm dan 1,5 cm sehingga diperoleh arus spot plasma yang berbeda untuk kedua sistem elektroda ignitor. Hasil pengujian spot plasma pada permukaan katoda ignitor menggunakan material Ag, Al, Cd dan Cu masing-masing diperoleh arus spot plasma 14,32 A, 12,34 A, 12,56 A dan 10,58 A, dan lebar pulsa 22 μ s, 39 μ s, 38 μ s, 34 μ s. Material katoda yang cukup baik untuk sistem elektroda ignitor adalah magnesium maupun aluminium karena mempunyai laju erosi γ rendah (11,7 μ g/C dan 14 μ g/C) sehingga tidak mudah tererosi dan rusak. Dari hasil pengujian spot plasma serta hasil perhitungan diperoleh massa katoda tererosi untuk material Al yang paling rendah yaitu 6,74 nano gram dan katoda berkurang sepanjang 88,26 μ m, sedangkan massa katoda tererosi paling tinggi adalah Cd (laju erosi 43,9 μ g/C) sebesar 20,95 nano gram, dimana katoda berkurang sepanjang 85,67 μ m.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan penelitian ini dibiayai oleh PSTA melalui DIPA tahun 2014. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Kepala PSTA dan juga seluruh peneliti dan pembantu peneliti kegiatan

rancangbangun sumber elektron katoda plasma, atas bantuan baik teori maupun teknis sehingga pelaksanaan kegiatan uji fungsi sistem elektroda ignitor dapat terlaksana dengan baik, dan penulisan karya tulis ilmiah ini dapat terwujud.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lely susita R.M., Sudjatomoko, Wirjoadi, Agus Purwadi. "Karakterisasi Spot Plasma Pada Permukaan Katoda Sistem Elektroda Ignitor", *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, pp. 50-55, juni 2013.
- [2] E.M. Oks. Lecture 8: Introduction of Plasma Cathode Electron Source, presented in BATAN Accelerator School, Yogyakarta, Indonesia, pp. 1–17, December 5th -9th, 2011.
- [3] RH. Huddleston and SN. Leonard, *Plasma Diagnostic Techniques*, New York: Academic Press, pp. 113-117, 1995.
- [4] Y. Bing, W. Yutian, L. Hui, W. Huixin, C. Yiqiang, *Sensors & Transducers*, Vol. 165, Issue 2, pp. 35 – 39, February 2014.
- [5] Lely Susita RM., Sudjatomoko, Bambang Siswanto, Ihwanul Aziz. "Analisis Uji Fungsi Sistem Elektrode Ignitor Untuk Sumber Elektron Katode Plasma", *Jurnal Iptek Nuklir Ganendra*, Volume 18 Nomor 2, pp. 95-106 Juli. 2015.
- [6] E. M. Oks, K. P. Savkin, G. Y. Yushkov, and G. Nikolaev, "Measurement of total ion current from vacuum arc plasma sources", pp. 1–7, 2006.
- [7] V. A. Burdovitsin, A. V. Kazakov, A. V. Medovnik, and E. M. Oks, "Influence of gas pressure on electron beam emission current of pulsed cathodic-arc-based forevacuum plasma electron source," *Phys. Plasmas*, vol. 24, no. 9, pp. 93109, 2017.
- [8] N. V Gavrilov and A. I. Men'shakov, "Generation of a pulsed high-current low-energy beam in a plasma electron source with a self-heated cathode," *Tech. Phys.*, vol. 61, no. 5, pp. 669–675, 2016.
- [9] A. V. Kazakov, A. V. Medovnik, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, "Pulsed cathodic arc for forevacuum-pressure plasma-cathode electron sources," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 43, no. 8, pp. 2345–2348, 2015.
- [10] A. S. Metel and Y. A. Melnik, "A high-current plasma emitter of electrons based on a glow discharge with a multirod electrostatic trap," *Instruments Exp. Tech.*, vol. 56, no. 3, pp. 317–324, 2013.
- [11] V. Nemchinsky, "Erosion of thermionic cathodes in welding and plasma Arc cutting systems," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, no. 1, pp. 199–215, 2014.
- [12] V. Nemchinsky, "Cathode erosion due to evaporation in plasma arc cutting systems," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 33, no. 2, pp. 517–526, 2013.
- [13] V. Nemchinsky, "Cathode erosion in a high-pressure high-current arc: calculations for tungsten cathode in a free-burning argon arc," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 13, pp. 135–201, 2012.
- [14] E. Oks, V. Burdovitsin, A. Medovnik, and Y. Yushkov, "Plasma electron source for the generation of wide-aperture pulsed beam at forevacuum pressures," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, no. 2, pp. 023–301, 2013.
- [15] A. A. Zenin, A. S. Klimov, V. A. Burdovitsin, and E. M. Oks, "Generating stationary electron beams by a forevacuum plasma source at pressures up to 100 Pa," *Tech. Phys. Lett.*, vol. 39, no. 5, pp. 454–456, 2013.