

PERANCANGAN SISTEM ELEKTRODE IGNITOR UNTUK PERANGKAT SISTEM IRADIATOR ELEKTRON PULSA

Lely Susita R.M. dan Ihwanul Aziz

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281

email:susita@batan.go.id, ihwanul@batan.go.id

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM ELEKTRODE IGNITOR UNTUK PERANGKAT IRADIATOR ELEKTRON PULSA. Sistem elektrode ignitor yang dirancang adalah suatu sistem yang berfungsi untuk menginisiasi lucutan plasma terdiri dari 2 buah yang ditempatkan di sisi kiri dan kanan bejana plasma. Masing-masing sistem elektrode ignitor terdiri dari katode, anode dan isolator antara katode dan anode. Material katode untuk sistem elektrode ignitor paling baik menggunakan material Mg karena mempunyai laju erosi ion γ_i paling rendah ($11,7 \mu\text{g}/\text{C}$) sehingga tidak mudah rusak (tererosi), serta mempunyai energi kohesif yang rendah ($1,51 \text{ eV}$). Sistem elektrode ignitor untuk perangkat sistem iradiator elektron pulsa yang dirancang mempunyai spesifikasi : material katode terbuat dari Mg berbentuk batang (rod) diameter 6,35 mm dan panjang 76,75 mm. Material anode terbuat dari SS 304 non magnetik berbentuk silinder dengan diameter luar 88,53 mm, diameter dalam 81,53 mm dan tebal 3,50 mm. Material isolator antara katode dan anode terbuat dari teflon berbentuk silinder, diameter luar 9,50 mm, diameter dalam 6,35 mm dan panjang 30 mm. Berdasarkan perancangan sistem elektroda ignitor, tahap selanjutnya akan dilakukan pembuatan serta uji fungsi dari sistem elektroda ignitor.

Kata kunci : sistem elektrode ignitor, material elektrode ignitor, sistem iradiator elektron pulsa

ABSTRACT

IGNITOR ELECTRODE SYSTEM DESIGN FOR THE PULSES ELECTRON IRRADIATORS DEVICE. The designed ignitor electrode system is a system used to initiate the plasma discharge. It consists of two pieces which are placed on both side of the plasma vessel. Each of the ignitor electrode system consists of a cathode, an anode and insulator between the cathode and the anode. The best cathode material for ignitor electrode system is Mg due to its lowest ion erosion rate ($\gamma_i = 11.7 \mu\text{g} / \text{C}$) and its low cohesive energy (1.51 eV). The specifications of ignitor electrode system designed for the pulse electron irradiators is as follow: Mg cathode materials in the form of rod having a diameter of 6.35 mm and length of 76.75 mm. Anode material are made of non magnetic of SS 304 cylinder shaped with an outer diameter of 88.53 mm, an inner diameter of 81.53 mm and a thickness of 3.50 mm. Insulating material between the cathode and the anode is made of teflon cylinder shaped, outer diameter of 9.50 mm, an inner diameter of 6.35 mm and a length of 30 mm. Based on the ignitor electrode system design, the next step is construction and function test of the ignitor electrode system.

Keywords : ignitor electrode system, ignitor electrode material, pulses electron irradiators system

PENDAHULUAN

Pada saat ini perdagangan dunia telah memasuki era globalisasi, dimana negara-negara konsumen mempunyai tuntutan kualitas yang tinggi dari produk pertanian dan produk makanan olahan yang diekspor. Irradiasi elektron pada produk pertanian dan produk makanan olahan bertujuan untuk membasmi bakteri, jamur atau parasit yang menyebabkan keracunan pada manusia, dan juga untuk memperpanjang usia simpan produk pertanian. Usia simpan tersebut menjadi salah satu masalah serius apabila produk pertanian tersebut ditujukan untuk cadangan pangan nasional atau komoditas ekspor. Proses iradiasi dapat dimanfaatkan untuk memperpanjang usia simpan dengan menghambat pematangan atau pertunasan, serta dapat mengendalikan organisme pembusuk pada produk pertanian [1]. Oleh karena itu, aplikasi teknologi iradiasi elektron untuk pengawetan produk pertanian dapat memperkuat ketahanan pangan

nasional, dan meningkatkan daya saing komoditas ekspor yang berdampak meningkatkan devisa negara.

Sesuai dengan tugas dan fungsi PSTA-BATAN, pada tahun-tahun sebelumnya telah dilakukan penelitian dan pengembangan sumber elektron berbasis katode plasma yang dapat dimanfaatkan untuk perangkat iradiator elektron pulsa. Komponen iradiator elektron pulsa berbasis sumber elektron katode plasma terdiri dari bejana plasma, generator plasma, tegangan pemercepat dan pompa vakum. Bejana plasma yang juga disebut anode berongga mempunyai dua sistem elektrode pembentuk plasma di sisi kiri dan kanan, dengan grid yang dipasang dibawah dinding bejana yang juga berperan sebagai anode. Sistem elektrode ignitor yang dirancang untuk perangkat sistem iradiator elektron pulsa adalah suatu sistem yang berfungsi untuk menghasilkan spot plasma pulsa pada permukaan katode ignitor.

Dalam pelaksanaan kegiatan perancangan sistem elektrode ignitor telah dilakukan pembuatan dokumen perancangan sistem elektrode ignitor yang meliputi : pembuatan deskripsi sistem elektrode ignitor yang terdiri dari bagian-bagian sistem elektrode ignitor dan jenis material sistem elektrode ignitor, penyusunan rancangan dasar sistem elektrode ignitor yang meliputi kriteria dadal dan hukum Paschen, serta rancangan detil sistem elektrode ignitor yang memuat spesifikasi teknis dan gambar teknik sistem elektrode ignitor.

TATA KERJA

Deskripsi Sistem Elektrode Ignitor

Sistem elektrode sumber elektron katode plasma terdiri dari dua sistem elektrode yaitu sistem elektrode ignitor dan sistem elektrode generator plasma, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem elektrode ignitor yang menginisiasi lucutan terdiri dari dua buah elektrode ignitor yang dilengkapi dengan dua unit sistem catudaya lucutan ignitor (IDPS). Sistem elektrode ignitor terdiri dari katode, anode dan isolator antara katode dan anode. Sistem elektrode generator plasma sebagai pembentuk plasma dalam bejana plasma dilengkapi dengan dua unit sistem catu daya lucutan busur (ADPS). Sistem elektrode generator plasma terdiri dari katode yang juga sama dengan katode elektrode ignitor dan anode yang juga sebagai dinding bejana plasma.

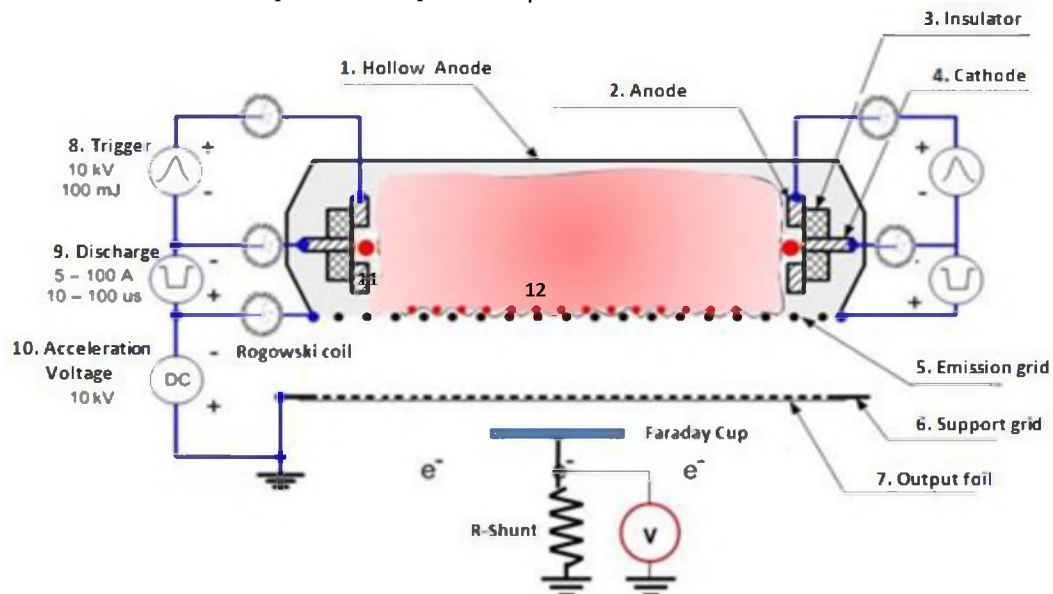
Sumber elektron katode plasma terdiri dari dua sistem elektrode penghasil plasma di sebelah kiri dan kanan, sistem tersebut ditunjukkan [2-4] pada Gambar 1. Sistem elektrode pembentuk plasma,

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 anode (2) dan melalui isolator (3) akan membentuk spot plasma (11) di permukaan katode (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). 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 anode berongga (1). Jika kedua sistem elektrode berjalan serempak maka keseluruhan ruang anode 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 $15 \times 60 \text{ cm}^2$.

Material Sistem Elektrode Ignitor

1. Material katode.

Spot plasma di permukaan katode mempunyai ukuran mikrometer dan berintensitas cukup tinggi. Parameter dari spot plasma adalah laju erosi ion (*ionerosion rate*), dapat ditentukan dengan cara mengukur arus ion maksimum pada kondisi lucutan busur.



Gambar 1. Sistem Sumber Elektrode Katode Plasma [2, 3]

Dari hasil eksperimen yang dilakukan oleh para peneliti sebelumnya bahwa laju erosi ion merupakan karakteristik dari bahan katode dan tidak tergantung

dari besarnya arus lucutan busur [4-7]. Laju erosi ion umumnya lebih besar untuk unsur dengan energi kohesif rendah. Bahan-bahan yang mempunyai

energi kohesif lebih besar memerlukan energi lebih besar untuk transformasi fasa bahan katode padat menjadi plasma.

Laju erosi ion dari material katode dapat ditentukan dengan cara mengukur arus ion total I_i , arus lucutan I_{arc} , dan distribusi muatan (*charge state distribution*) Q_i , berdasarkan rumus

$$\gamma_i = \frac{I_i}{I_{arc}} \cdot \frac{M_i}{e Q_i} = \alpha_i \cdot \frac{M_i}{e Q_i}, \quad (1)$$

dimana normalisasi arus ion $\alpha_i = I_i/I_{arc}$, M_i adalah massa atom dari material katode, e adalah muatan keunsuran ($1,602 \times 10^{-19}$ coulomb). Hasil penelitian laju erosi ion untuk berbagai bahan katode disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai normalisasi arus ion dan laju erosi ion pada arus lucutan 100 A [4-7]

| Material Katoda | Energi Kohesif (eV/atom) | α_i (%) | γ_i ($\mu\text{g/C}$) |
|-----------------|--------------------------|----------------|--------------------------------|
| C | 7,37 | 11,3 | 13,5 |
| Mg | 1,51 | 8,3 | 11,7 |
| Ag | 2,95 | 6,0 | 27,8 |
| Al | 3,39 | 8,3 | 14 |
| Cu | 3,49 | 6,8 | 19,3 |
| Cd | 1,16 | 5,8 | 43,9 |
| Ti | 4,85 | 6,8 | 15,2 |
| Fe | 4,28 | 6,0 | 16,9 |
| Ni | 4,44 | 4,8 | 14,5 |
| Co | 4,39 | 5,0 | 15,3 |

Dari data pada Tabel 1 dapat diketahui bahwa material katode untuk sistem elektrode 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 (tererosi), serta mempunyai energi

kohesif yang rendah (pada energi 1,51 eV telah terbentuk plasma). Semakin besar arus menuju katode maka semakin besar spot plasma yang dihasilkan sehingga semakin besar pula partikel magnesium tererosi.

2. Material anode.

Kriteria dari bahan anode pada sistem elektrode adalah

1. Tahan terhadap suhu tinggi
2. Tahan terhadap korosi
3. Sifat daktilitas (keuletan) tinggi, sehingga dapat dengan mudah dibentuk

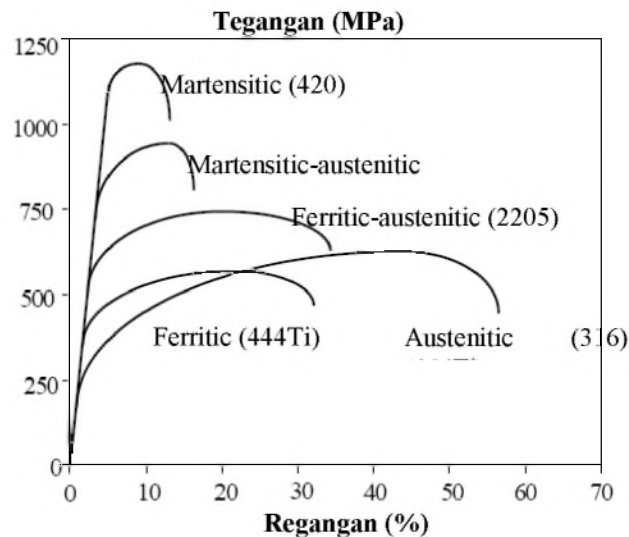
Material anode pada sistem elektrode ignitor adalah stainless steel (baja tahan karat) austenit yang sering digunakan dalam aplikasi yang memerlukan material bukan magnet.

Stainless Steel (SS) adalah paduan besi dengan minimal 12 % kromium. Komposisi ini membentuk *protective layer* (lapisan pelindung anti korosi) yang merupakan hasil oksidasi oksigen terhadap krom yang terjadi secara spontan. Meskipun seluruh kategori SS didasarkan pada kandungan krom (Cr), namun unsur paduan lainnya ditambahkan untuk memperbaiki sifat-sifat SS sesuai aplikasinya.

Berdasarkan fasanya, stainless steel dapat dibagi menjadi enam kelompok: martensit, martensit-austenitik, feritik, feritik-austenitik, austenitik dan *precipitation hardening steels*. Kelima nama kelompok yang pertama mengacu pada komponen dominan dari struktur mikro baja (steel). Nama kelompok terakhir mengacu pada baja yang dikeraskan dengan mekanisme khusus yang melibatkan pembentukan endapan dalam struktur mikro baja. Dan hanya ada satu kategori dari baja tahan karat yang non-magnetik yaitu: baja austenitik, sedangkan yang lain adalah bersifat magnetik.

Tabel 2. Komposisi untuk berbagai kategori baja tahan karat (*stainless steel*) [8,9]

| Kategori Baja | Komposisi (Berat %) | | | | | Sifat Kekerasan | Sifat Kemagnetan |
|--------------------------------|---------------------|----------------|------------|------------|----------------------|------------------------|------------------|
| | C | Cr | Ni | Mo | Lainnya | | |
| Martensit | >0,10 >0,17 | 11-14 16-18 | 0-1 0-2 | - 0-2 | V | Dapat dikeraskan | Magnet |
| Martensit-Austenit | <0,10 | 12-18 | 4-6 | 1-2 | | Dapat dikeraskan | Magnet |
| <i>Precipitation Hardening</i> | | 15-17 12-17 | 7-8 4-8 | 0-2 0-2 | Al Al, Cu, Ti, Nb | Dapat dikeraskan | Magnet |
| Ferit | <0,08 <0,25 | 12-19 24-28 | 0-5 - | <5 - | Ti | Tidak dapat dikeraskan | Magnet |
| Ferit-Austenit (Duplex) | <0,05 | 18-27 | 4-7 | 1-4 | N, W | Tidak dapat dikeraskan | Magnet |
| Austenit | <0,08 | 16-30 | 8-35 | 0-7 | N, Cu, Ti, Nb | Tidak dapat dikeraskan | Bukan Magnet |



Gambar 2. Kurva tegangan-regangan untuk berbagai tipe stainless steel [8,9]

Sifat Mekanik Stainless Steel

SS dapat dibagi menjadi empat kelompok dengan sifat yang sama dalam setiap kelompok: martensitik dan feritik-martensitik, feritik, austenitik-feritik dan austenitik.

Perbedaan sifat mekanik SS terlihat pada kurva tegangan-regangan Gambar 2. Baja martensitik mempunyai kekuatan tarik (*tensile strengths*) tinggi tetapi sifat daktilitasnya (keuletan) rendah, sedangkan kekuatan baja austenitik rendah dan daktilitasnya sangat baik. Baja feritik-austenitik dan

feritik mempunyai sifat mekanik di antara baja martensitik dan austenitik.

Sifat Fisik Stainless Steel

Tabel 3 menunjukkan nilai berbagai sifat fisik dari *stainless steel*. Komponen anode pada sistem elektrode ignitor dan anode pada sistem elektrode generator plasma yang merupakan dinding bejana plasma dibuat dari material SS 304 (kelompok baja tahan karat austenitik), karena SS 304 mempunyai sifat daktilitas (keuletan) tinggi sehingga dapat dengan mudah dibentuk, sifat mampu las yang baik (*weldability*) dan non magnetik.

Tabel 3. Sifat fisik untuk berbagai tipe stainless steel [8, 9]

| Sifat Fisik | Tipe Stainless Steel | | | |
|--|----------------------|---------|--------------|--------------------|
| | Martensitik | Feritik | Austenitik | Feritik-Austenitik |
| Densitas (g/cm^3) | 7,6-7,7 | 7,6-7,8 | 7,9-8,2 | 0,8 |
| Modulus Young (MPa) | 220 | 220 | 195 | 200 |
| Ekspansi Termal ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) 200-600 $^\circ\text{C}$ | 12-13 | 12-13 | 17-19 | 13 |
| Konduktivitas Termal ($\text{W/m}^\circ\text{C}$) 20 $^\circ\text{C}$ | 22-24 | 20-23 | 12-15 | 20 |
| Kapasitas Panas ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) 20 $^\circ\text{C}$ | 460 | 460 | 440 | 400 |
| Resistivitas ($\text{n}\Omega\text{m}$) 20 $^\circ\text{C}$ | 600 | 600-750 | 850 | 700-850 |
| Sifat Magnet | Magnet | Magnet | Bukan Magnet | Magnet |

Material Isolator

Fungsi yang paling penting dari material isolator adalah untuk mengisolasi/memisahkan bagian-bagian yang bertegangan satu sama lain dan terhadap bumi (*ground*). Namun demikian selain berfungsi sebagai isolator, material ini harus mampu menahan beban mekanis, mampu menahan beban panas maupun tahan terhadap korosi. Beban-beban tersebut

seringkali terjadi secara simultan, sehingga efek bersama dari berbagai parameter tersebut harus diketahui. Dalam sumber elektron katode plasma, isolator digunakan untuk sekat antara katode dan anode dan akan menerima beban tekan, radiasi, lingkungan reaktif (plasma), beroperasi pada temperatur plasma yang cukup tinggi dan dioperasikan pada tegangan tinggi pula (150 kV). Berdasarkan pertimbangan tersebut maka sebagai

isolator dipilihlah *teflon* (PTFE) atau poliamide (PA6) yang sifat-sifatnya disajikan pada Tabel 5.

Material Teflon

Nama *teflon* merupakan nama dagang, nama ilmiahnya adalah *politetrafluoroetilena* dan disingkat dengan *PTFE*. Polimer jenis ini dihasilkan dari proses polimerisasi adisi senyawa turunan etilen yaitu *tetrafluoroetilena* ($CF_2 = CF_2$). *Teflon* sangat tahan terhadap bahan kimia, tahan panas, mempunyai koefisien gesek yang rendah (tidak mudah aus), mempunyai permukaan yang sangat halus (licin), sifat ini menjadikan *teflon* sangat cocok untuk diaplikasikan dalam pembuatan segel (seal) temperatur tinggi, isolator maupun bagian dari bantalan (*bearing*). Teflon merupakan jenis isolator yang terbuat dari bahan organik yang mampu beroperasi diatas temperature 180°C hingga

maksimum 260°C. Tipe, warna maupun bentuk *teflon* yang tersedia dipasaran disajikan pada Tabel 4.

Material Poliamide (PA6)

Poliamida merupakan keluarga polimer yang membentuk hubungan amida (CO-NH) selama polimerisasi dan disebut poliamida (PA). Yang paling penting anggota keluarga PA adalah nilon, yang kedua adalah nilai utama nilon adalah 6, angka 6 menunjukkan jumlah atom karbon dalam monomer. Sifat dari PA 6 ini kuat, sangat elastis, tangguh, abrasi perlawanan, *self* pelumas. Sifat-sifat ini membuat PA6 mempunyai sifat mekanik yang stabil bahkan sampai pada temperatur 1250°C. Salah satu kekurangan dari PA6 adalah bahwa ia sangat mudah menyerap air dengan disertai sifat degradasi. Sifat-sifat mekanik, elektrik dan termal PA 6 disajikan pada Tabel 5.

Tabel 4.Beberapa Tipe, Warna dan Bentuk dari Teflon [10]

| Type (Tipe) | Color (warna) | Shape (Bentuk) |
|---|---------------------------|---|
| Virgin, Carbon-filled Bronze, Glass-filled and Etched | White, Black and Brown | Sheet(Lembaran), Rod (Lonjoran), Hollow (Rongga), Tubing (Tabung), and Strip(Sirip) |

Tabel 5.Sifat-Sifat (Mekanik, Termal dan Elektrik) Teflon dan Matetrial Sejenisnya [10]

| No | Description | Unit | PTFE (Teflon) | PE | PC | POM | PP | PVC | PA6 |
|--|-------------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Mechanical Properties (Sifat Mekanik) | | | | | | | | | |
| 1 | Density | g/cm ³ | 2,18 | 0,97 | 1,2 | 1,41 | 1 | 1,4 | 1,7 |
| 2 | Coefsisient of Friction | - | 0,05 | 0,2 | 0,31 | 0,032 | 0,25 | - | 0,36 |
| 3 | Tensile Strength | MPa | 33,4 | 22,1 | 40 | 60 | 33 | 55 | 76 |
| 4 | Elongation of Break | % | 500 | 400 | 110 | 35 | 148 | 33 | 30 |
| 5 | Ball Indentation Hardness | N/mm ² | 30 | 38 | 80 | 140 | 75 | 75 | 165 |
| 7 | Modulus of Elasticity | N/mm ² | 700 | 700 | 2300 | 3200 | 1450 | 3000 | 3100 |
| Thermal Properties (Sifat Termal) | | | | | | | | | |
| 1 | Max Continuous Operating Temperatur | °C | 260 | 80 | 125 | 110 | 90 | 60 | 100 |
| 2 | Linear Expansion Factor @23°C | K ⁻¹ | 1,7x10 ⁴ | 1x10 ⁴ | 0,7x10 ⁴ | 1x10 ⁴ | 1,5x10 | 0,8x10 ⁴ | 0,8x10 ⁴ |
| 3 | Thermal Conductivity @23°C | W/m*K | 0,21 | 0,4 | 0,19 | 0,31 | 0,22 | 0,14 | 0,23 |
| Electrical Properties | | | | | | | | | |
| 1 | Volume Resistance | Ohm.cm | > 10 ¹⁸ | > 10 ¹⁵ | > 10 ¹⁷ | > 10 ¹⁵ | > 10 ¹⁶ | > 10 ¹⁵ | > 10 ¹⁵ |
| 2 | Surface Resistance | Ohm | > 10 ¹⁴ | > 10 ¹⁴ | > 10 ¹⁵ | > 10 ¹³ | > 10 ¹³ | > 10 ¹³ | > 10 ¹³ |
| 3 | Dielectric Strength | kV/mm | 11 | 45 | 27 | 55 | 127 | 20 | 26,4 |

Material isolator antara katode ignitor dan anode ignitor terbuat dari *teflon*, karena mempunyai nilai resistivitas elektrik yang tinggi ($>10^{18} \Omega \text{ cm}$), sedangkan material isolator pada sistem elektrode

generator plasma dibuat dari *poliamide* (PA6), karena konstruksi isolator antara katode ignitor dan anode generator plasma memerlukan sifat mekanik (kekerasan) yang tinggi.

Rancangan Dasar Sistem Elektrode

Teori Dasar Rumusan Paschen

Lucutan gas di antara dua elektrode sejajar dengan jarak d yang dikenai tegangan V_0 seperti diperlihatkan pada Gambar 1, diawali dengan proses ionisasi oleh elektron bebas. Elektron bebas yang ada di sekitar katode mengalami percepatan oleh medan listrik E yang besarnya sekitar $(V-iR)/d$. Dalam perjalanan menuju anode elektron bertumbukan dan membentuk ion-ion baru, sehingga elektron menjadi semakin banyak, menurut persamaan [11,12].

$$N_e(x) \approx e^{\ln\left(\frac{x}{2\lambda_i}\right)} \quad (1)$$

atau

$$N_e(x) \approx e^{\alpha \cdot x} \quad (2)$$

dengan

$$\alpha \approx \frac{\ln 2}{\lambda_i} \quad (3)$$

λ_i adalah jalan bebas rata-rata ionisasi karena tumbukan elektron, dan α adalah koefisien ionisasi Townsend pertama. Besarnya populasi elektron $N_e(x)$ konsentrasi elektron $n_e(x)$, serta arus elektron $i_e(x)$ direlasikan menurut persamaan:

$$N_e(x) = N_e(x=0)e^{\alpha x} \quad (4)$$

$$n_e(x) = n_e(x=0)e^{\alpha x} \quad (5)$$

$$i_e(x) = i_e(x=0)e^{\alpha x} \quad (6)$$

Seluruh elektron yang menuju anode dengan kecepatan tinggi, sedangkan ion (karena massanya yang besar) menuju katode dalam waktu yang jauh lebih lama. Untuk selanjutnya dikenalkan koefisien ionisasi Townsend kedua γ , saat $e^{\alpha d} - 1 > 0$ ion positif menumbuk katode dan menghasilkan elektron sekunder baru sebanyak $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$.

Relasi fluks elektron sama dengan perkalian kerapatan dengan kecepatan elektron

$$\Gamma_e = n_e u_e \quad (7)$$

Untuk u_e adalah kecepatan elektron yang dapat direlasikan menurut persamaan (8)

$$u_e = k_e E = k_e (V_0 - iR)/d \quad (8)$$

k_e adalah mobilitas elektron

$$\text{Arus elektron } i_e = e(n_e u_e) = e\Gamma_e$$

Dengan demikian diperoleh fluks elektron yang diakibatkan oleh elektron primer Γ_{e1} dan fluks elektron yang dihasilkan oleh elektron sekunder Γ_{e2} . Fluks elektron dalam perjalanannya mengalami penguatan. Fluks elektron sekunder dapat direlasikan dengan persamaan (9)

$$\Gamma_{e2} = \gamma \left[(\Gamma_{e1} e^{\alpha d} - \Gamma_{e1}) + (\Gamma_{e2} e^{\alpha d} - \Gamma_{e2}) \right] \quad (9)$$

Sehingga fluks total elektron di $x=d$ ditunjukkan dengan persamaan (10)

$$\Gamma_{e2} = \Gamma_{e1} e^{\alpha d} + \Gamma_{e2} e^{\alpha d} \quad (10)$$

Persamaan (9) dapat disederhanakan menjadi persamaan (11)

$$\Gamma_{e2} = \frac{\gamma \Gamma_{e1} (e^{\alpha d} - 1)}{[1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)]} \quad (11)$$

Persamaan (11) dimasukkan ke persamaan (10) dan diperoleh persamaan (12)

$$\Gamma_{e2} I_d = \frac{\Gamma_{e1} e^{\alpha d}}{[1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)]} \quad (12)$$

Di $x = d$ seluruh arus dibawa oleh elektron, maka arus diperoleh dengan mengalikan persamaan (12) dengan elektronnya sehingga diperoleh persamaan

$$i I_d = i_{rangkai} = \frac{i_0 e^{\alpha d}}{[1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)]} \quad (13)$$

dengan mengandaikan γ tetap. Seandainya $\alpha(E)$ diketahui, maka akan diperoleh karakteristik arus dan tegangan pada lucutan Townsend dengan pengandaian $E = V/d$. Saat terjadinya lucutan dadal, lucutan busur atau lucutan spark, terjadi aliran arus yang dapat dikatakan tidak berhingga, dan terjadi saat :

$$[1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)] = 0 \quad (14)$$

Karena $e^{\alpha d} \gg 1$ maka $\gamma e^{\alpha d} \approx 1$, dan persamaan tersebut merupakan persyaratan terjadinya lucutan dadal, lucutan busur dan lucutan spark, dan peranan tahanan akan membatasi besarnya arus γ berperan sebagai penuplai elektron.

Hukum Paschen

Hukum Paschen menjelaskan ketergantungan tegangan dadal terhadap tekanan gas, p , dan jarak $gapd$. Hukum Paschen hanya berlaku untuk medan *uniform* di antara kedua elektrode, dimana medan listrik maksimum E yang besarnya V/d . Dari persamaan (14) diperoleh relasi

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (15)$$

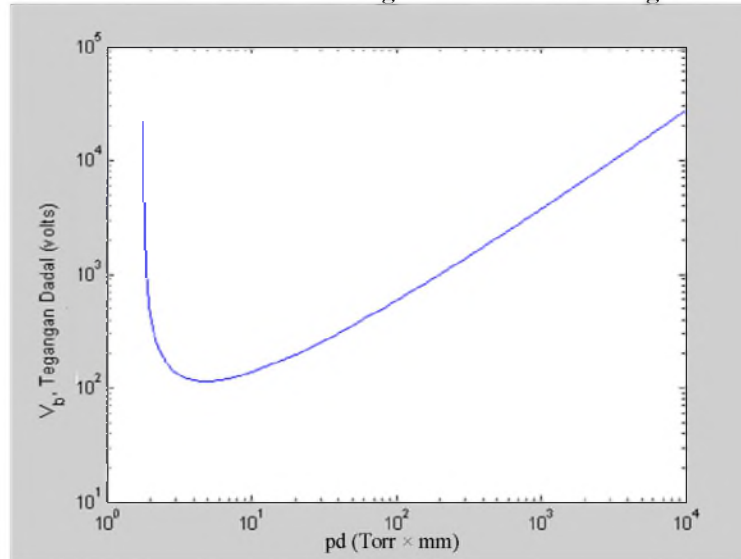
atau

$$e^{\alpha d} = \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (16)$$

atau

$$\alpha d = \ln \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right) \quad (17)$$

Kurva Lucutan Paschen Gas Argon dan Elektrode Tungsten



Gambar 3. Kurva tegangan dadal sebagai fungsi perkalian tekanan dan jarak [10].

Dari eksperimen koefisien ionisasi primer $\alpha = pA_i e^{\left(\frac{-B_i p}{E}\right)}$, dimana p adalah tekanan dan A_i dan B_i adalah tetapan yang tergantung kepada spesies gas. Koefisien α dimasukkan ke persamaan (17) akan diperoleh persamaan (18):

$$dpA_i e^{\left(\frac{-B_i p}{E}\right)} = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)$$

atau

$$\ln(pd A_i) - \frac{B_i p}{E} = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (18)$$

dengan memasukkan $E=V/d$ ke persamaan (18) diperoleh persamaan (19) :

$$\ln(pd A_i) - \frac{B_i pd}{V} = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (19)$$

Dengan mengganti $V=V_{dadal}$, dan untuk $\gamma=\gamma_j$, maka dari persamaan (19) diperoleh persamaan (20)

$$V_{dadal} = \frac{B_i p d}{\ln(pd A_i) - \ln\left(\frac{1}{\gamma_j} + 1\right)} \quad (20)$$

Maka persamaan (20) ini menunjukkan tegangan dadal fungsi dari tekanan dan jarak, dan inilah yang disebut hukum Paschen, dan khusus untuk gas argon dan elektrode tungsten, besarnya $A = 13.6$ (torr.cm)⁻¹, dan $B = 235$ (V/(torr cm)), dan $\gamma = 0.095$. Kurva

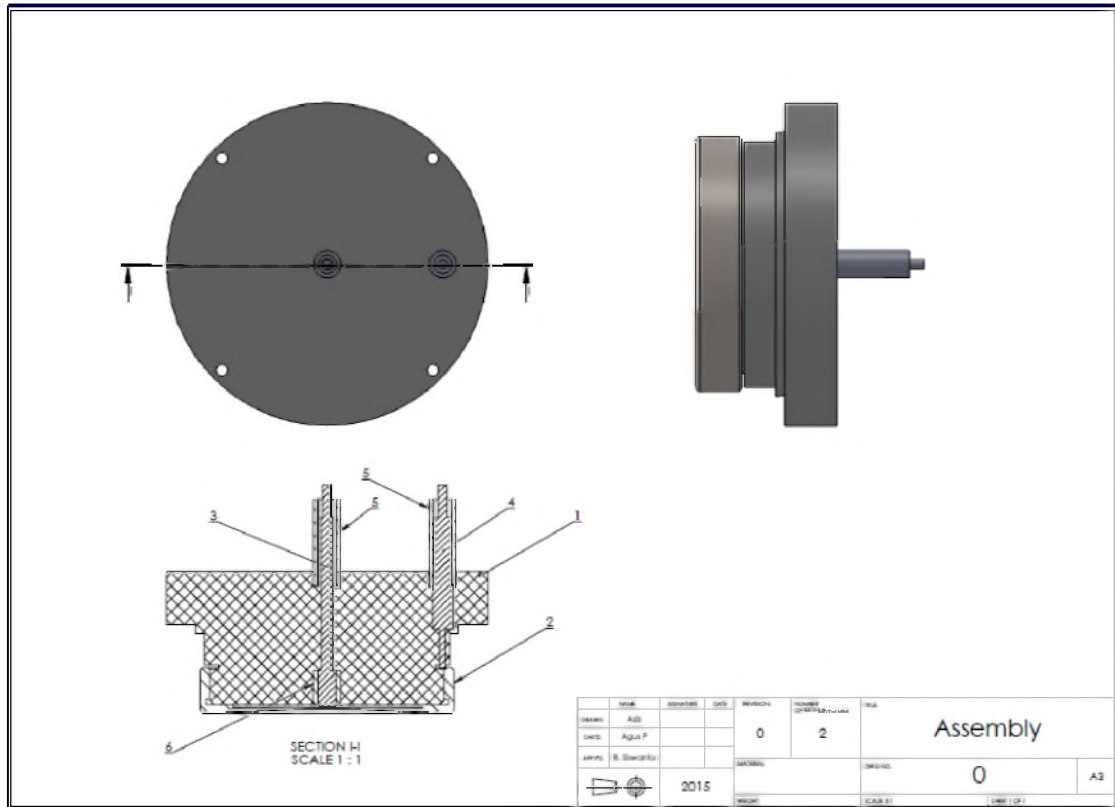
tegangan dadal sebagai fungsi perkalian tekanan dan jarak disajikan pada Gambar 3.

HASIL DAN PEMBAHASAN

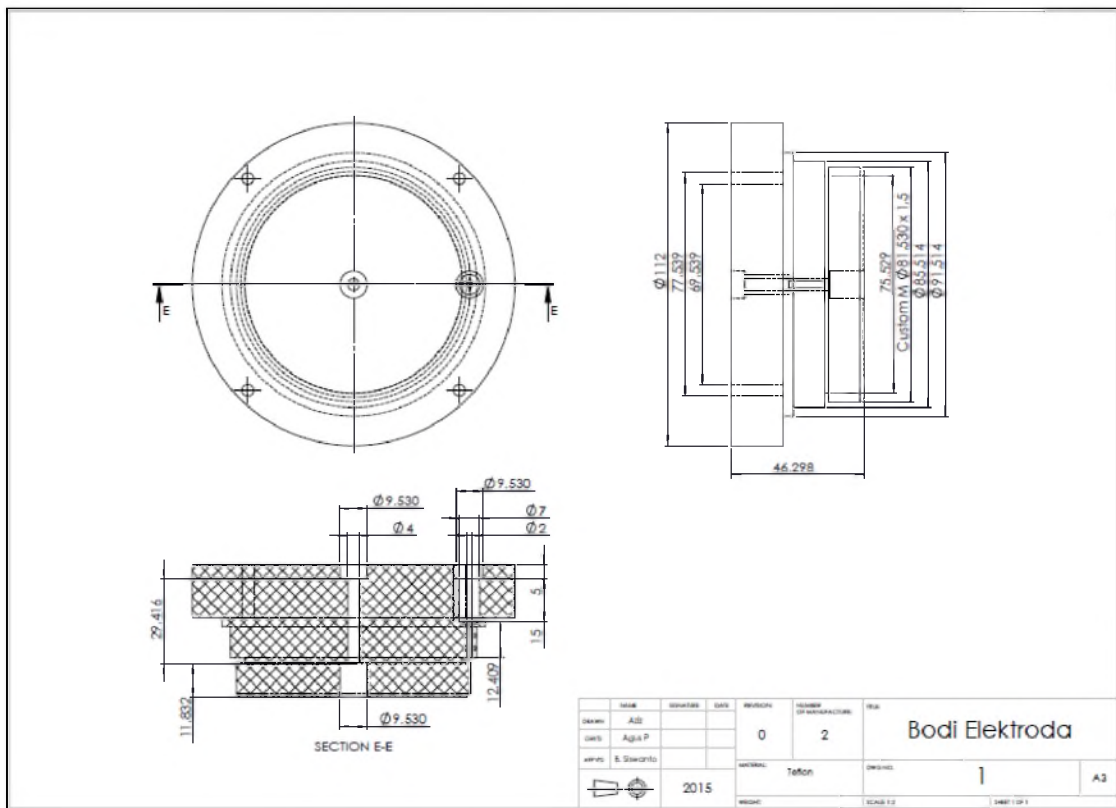
Perancangan Sistem Elektrode Ignitor

Untuk bejana plasma dengan tekanan sekitar 10⁻⁴ Torr, berdasar aturan Paschen, tegangan dadal antara katode dan anode sangat besar (sekitar ratusan kV untuk jarak elektrode beberapa cm), oleh karena itu sistem elektrode ignitor mempunyai susunan seperti ditunjukkan pada Gambar 5 [3]. Susunan elektrode ignitor yang utama terdiri dari katode dari bahan magnesium (2), kemudian isolator dari *teflon* (3) dan sebagai anoda dari bahan baja tahan karat (4). Bahan magnesium digunakan sebagai katoda, karena magnesium mempunyai sifat fisis laju erosi γ sebesar 11,7 $\mu\text{g/C}$ (C coulomb) dan tenaga kohesif rendah sekitar 1.51 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.

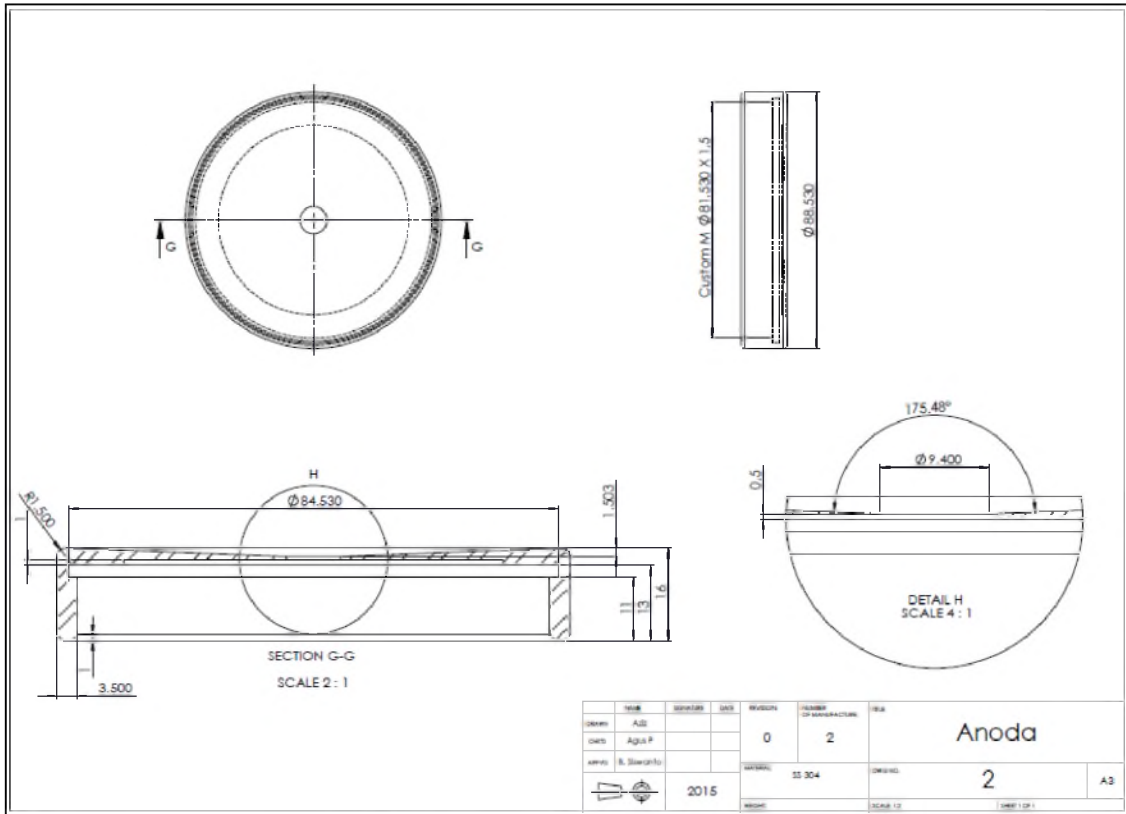
Pembuatan gambar teknik sistem elektrode ignitor yang terdiri dari gambar teknik komponen sistem elektrode ignitor yang telah dirangkai menjadi satu modul sistem elektrode ignitor serta gambar teknik komponen sistem elektrode ignitor yang terdiri dari bodi elektrode, katode, anode, isolator, konektor anode dan isolator katode, ditampilkan pada Gambar 5-11.



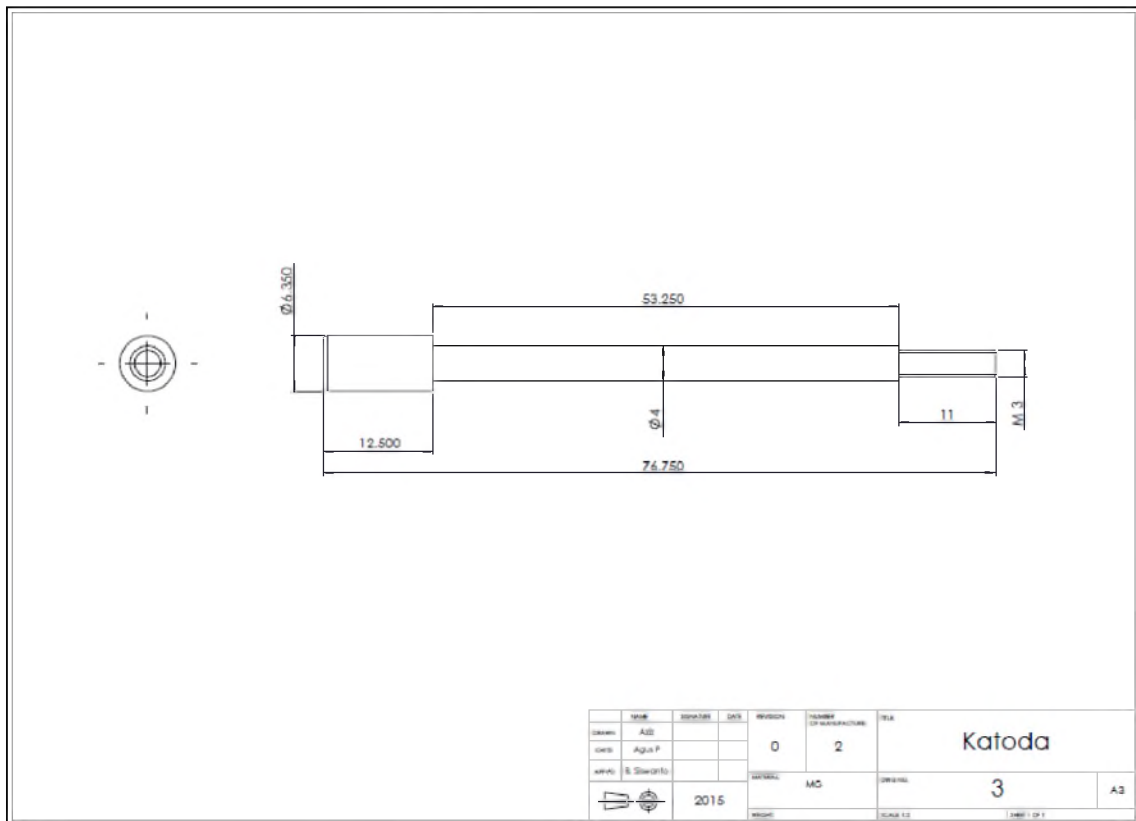
Gambar 5. Gambar teknik modul sistem elektrode ignitor.



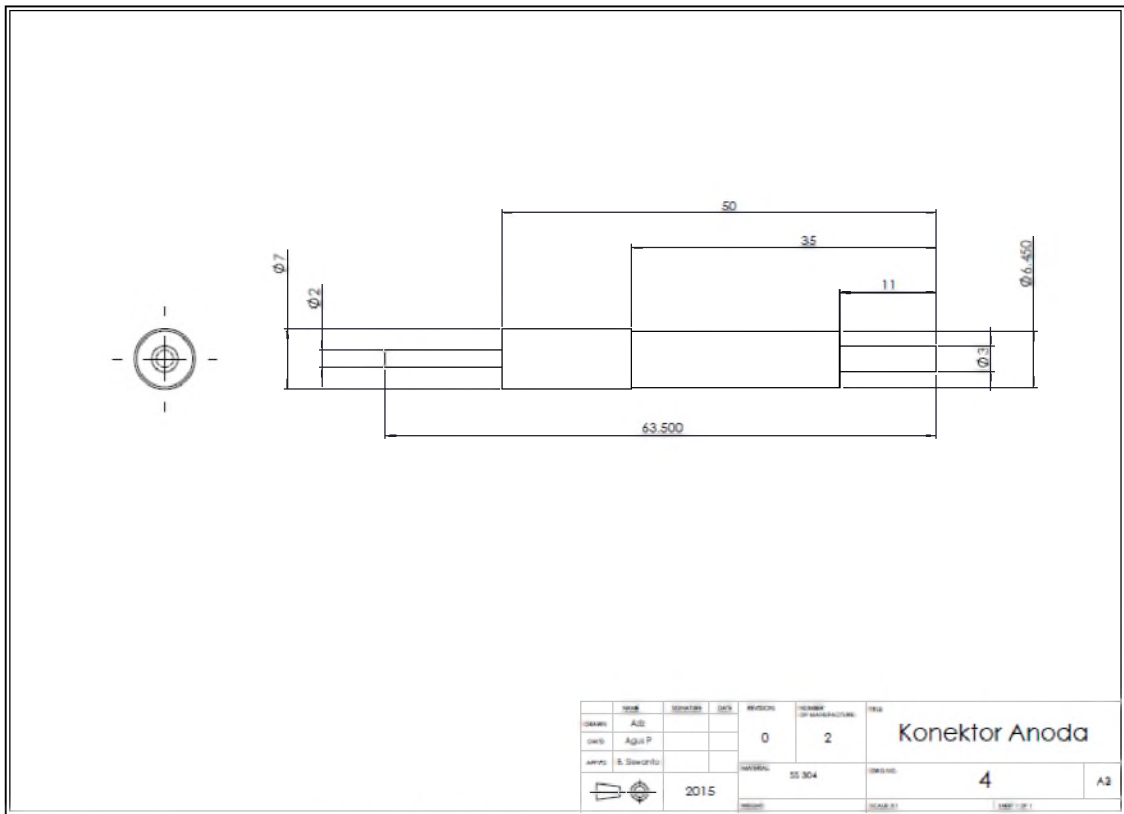
Gambar 6. Gambar teknik bodi elektrode



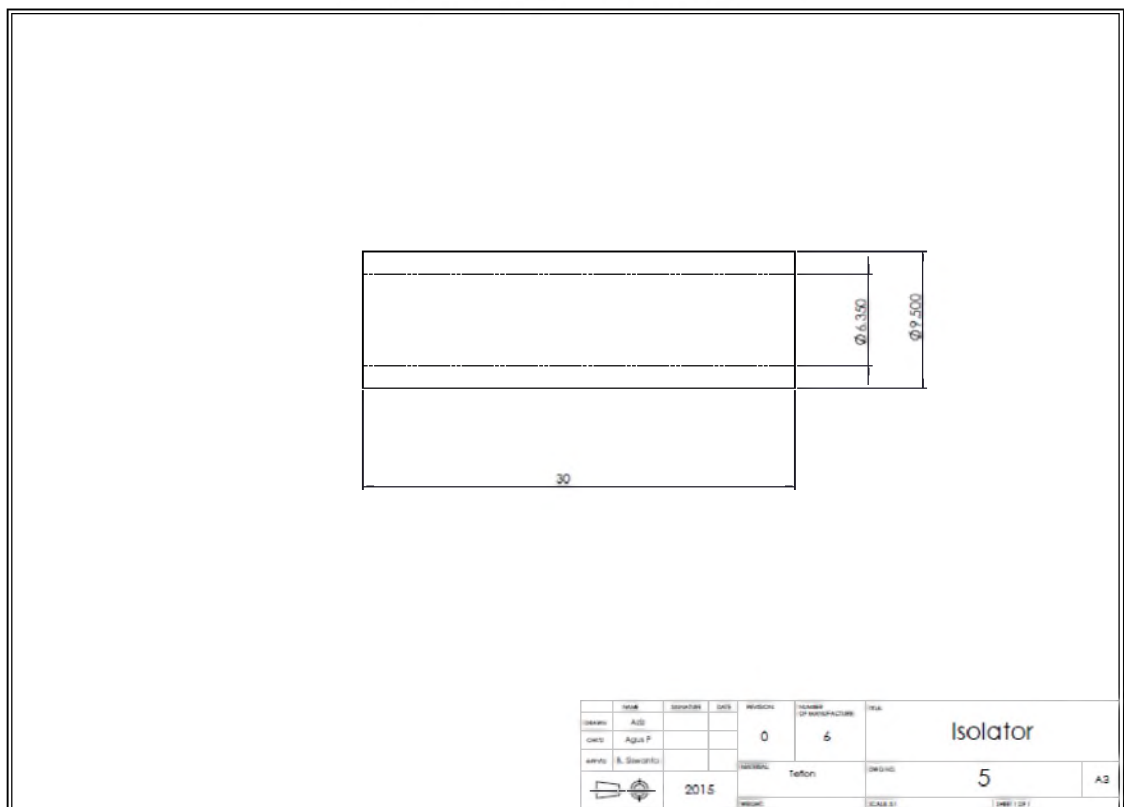
Gambar 7. Gambar teknik anode



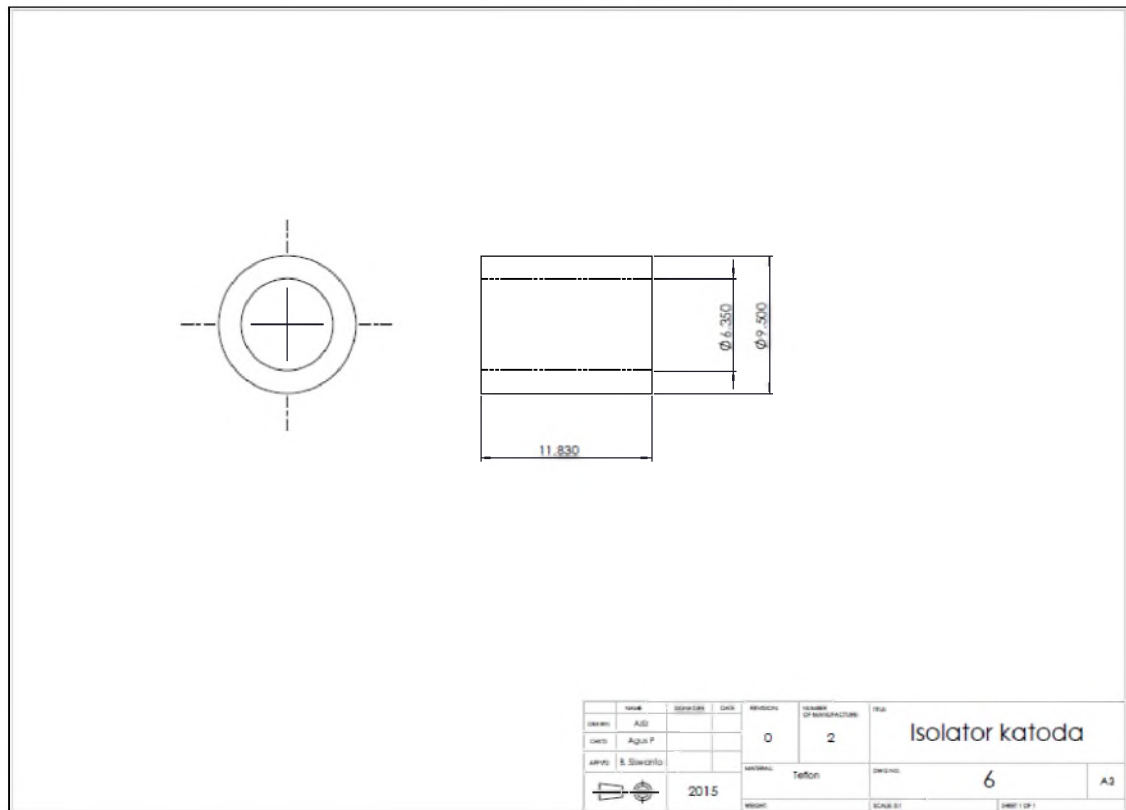
Gambar 8. Gambar teknik katode



Gambar 9. Gambar teknik konektor anode



Gambar 10. Gambar teknik isolator



Gambar 11. Gambar teknik isolator katode

Sistem elektrode ignitor untuk perangkat sistem iradiator elektron pulsa mempunyai spesifikasi : material katode terbuat dari Mg berbentuk batang (*rod*) diameter 6,35 mm dan panjang 76,75 mm. Material anode terbuat dari SS 304 non magnetik berbentuk silinder dengan diameter luar 88,53 mm, diameter dalam 81,53 mm dan tebal 3,50 mm. Material isolator antara katode dan anode terbuat dari teflon berbentuk silinder, diameter luar 9,50 mm, diameter dalam 6,35 mm dan panjang 30 mm (sesuai yang tertera pada gambar teknik)

Berdasarkan dokumen perancangan sistem elektrode ignitor yang memuat spesifikasi teknis dan gambar teknik sistem elektrode ignitor, tahap selanjutnya akan dilakukan pembuatan serta uji fungsi dari sistem elektrode ignitor.

KESIMPULAN

Telah dilakukan kegiatan pembuatan dokumen perancangan sistem elektrode ignitor untuk perangkat sistem iradiator elektron pulsa, yang meliputi: pembuatan deskripsi sistem elektrode yang terdiri dari bagian-bagian sistem elektrode dan jenis material sistem elektrode, penyusunan rancangan dasar sistem elektrode ignitor yang meliputi kriteria dadal dan hukum Paschen, serta rancangan detil sistem elektrode ignitor yang memuat spesifikasi teknis dan gambar teknik sistem elektrode ignitor. Sistem elektrode ignitor untuk perangkat sistem

iradiator elektron pulsa mempunyai spesifikasi: material katode terbuat dari Mg berbentuk batang (*rod*) diameter 6,35 mm dan panjang 76,75 mm. Material anode terbuat dari SS 304 non magnetik berbentuk silinder dengan diameter luar 88,53 mm, diameter dalam 81,53 mm dan tebal 3,50 mm. Material isolator antara katode dan anode terbuat dari teflon berbentuk silinder, diameter luar 9,50 mm, diameter dalam 6,35 mm dan panjang 30 mm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan penelitian ini dibiayai oleh PSTA melalui DIPA Tahun 2015. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Kepala PSTA dan juga seluruh peneliti dan pembantu peneliti kegiatan rancang bangun perangkat sistem iradiator elektron pulsa berbasis sumber elektron katode plasma, sehingga pelaksanaan kegiatan pembuatan dokumen perancangan sistem elektrode ignitor untuk perangkat sistem iradiator elektron pulsa dapat terwujud.

DAFTAR PUSTAKA

1. I.E. Pol et. al., *Pulse Electric Field Treatment Enhances the Bactericidal Action of Nisin Against Bacillus Cereus*, Appl & Environmental Microbiology, 66, 428, 2000.

2. Sudjatmoko, dkk., *Perancangan Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA*, Prosiding PPI Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, P3TM-BATAN Yogyakarta Vol. 1, No. 1, 1999.
3. Efim Oks, *Plasma Cathode Electron Sources*, Wiley Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. ISBN: 3-527-40634-4. 2006.
4. A. Anders, E.M. Oks, G. Yu Yushkov, K.P. Savkin, Y. Brown, and A.G. Nikolaev, *Determination of the Specific Ion Erosion of the Vacuum Arc Cathode by Measuring the Total Ion Current from the Discharge Plasma*, *Technical Physics*, Vol. 51, No. 10, 1311 – 1315, 2006.
5. E.M. Oks, K.P. Savkin, G.Yu.Yushkov, And A.G. Nikolaev, *Measurement of Total Ion Current from Vacuum Arc Plasma Sources*, *Review of Scientific Instruments*, 77, 03B504-1 - 03B504-15, 2006.
6. A. Anders, E.M. Oks, G. Yu Yushkov, K.P. Savkin, I.G. Brown, A.G. Nikolaev, *Measurements of The Total Ion Flux from Vacuum Arc Cathode Spots*, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Volume 33, Issue 5, 1532 - 1536, 2005.
7. Savkin, K.P., *Measurement of Ion Erosion Rate of Cathode Material in a Vacuum Arc Discharge*, *Intense electron and ion beams*, 2006.
8. Lely Susita RM, Sudjatmoko, BA Tjipto Sujitno, Bambang Siswanto, Wirjoadi, *Pemilihan Jenis Material Elektroda Sumber Elektron Katoda Plasma*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator Dan Aplikasinya, ISSN 1411-1349, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, Volume 14, 2012.
9. H. Nordberg, *Mechanical Properties of Austenitic and Duplex Stainless Steels*, *Proc. Conf. Processes and Materials: Innovation Stainless Steel*, Florens, Italy, pp.2.217-2.229, 1993.
10. M.M. Mittal, *Properties of PTFE and Some Other Insulating Materials*, 2002, www.druflon.com/ptfeprop.htm, diakses Pebruari, 2012.
11. Hassouba, M.A., dkk., *Measurementsof The Breakdown Potentials for DifferentCathode Materials In The Townsend Discharge*, Physics Department, Faculty of Science, Benha University, Egypt, ISSN1330-0008, *Fizika A* 11(2), 81-90, 2002.
12. Sudjatmoko, dkk., *Kajian Kriteria Perancangan Untuk Sistem Sumber Elektron Katoda Plasma*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, ISSN 0216-3128, Pustek Akselerator dan Proses Bahan - BATAN, Yogyakarta, 2013.

TANYA JAWAB

Naila Zulfa

- Dalam pembunuhan bakteri dengan radiasi berkas elektron, mekanismenya bagaimana?
- Apakah kelebihan dan kekurangan alat tersebut?

Lely Susita

- Iradiasi elektron pada produk pertanian dan produk makanan olahan bertujuan untuk membasmi bakteri, jamur atau parasit yang menyebabkan keracunan pada manusia, dan juga untuk memperpanjang usia simpan produk pertanian. Menurut Zubaidah Irawati (2006), dalam teknologi iradiasi, terjadinya interaksi antara radiasi dengan materi (*sel hidup*), dapat menimbulkan berbagai proses fisika dan kimia di dalam materi tersebut, diantaranya dapat menghambat sintesa DNA dalam sel hidup misalnya serangga, telur, larva pupa dan mikroba. Energi yang dihasilkan oleh iradiator mampu untuk menumbuk elektron pada struktur atom, menimbulkan ionisasi karena terbentuk radikal bebas dan memiliki efek mematikan terhadap DNA. Akan tetapi energi yang dimiliki tidak cukup tinggi untuk memecah inti atomnya, sehingga tidak dapat menyebabkan produk yang diiradiasi menjadi radioaktif.
- Keunggulan/kelebihan dari iradiator elektron pulsa antara lain berkasnya lebih seragam, sederhana, mudah dalam pengoperasian dan perawatannya; serta tidak memerlukan tabung akselerator, sistem pemfokus dan sistem pemayar. Dengan demikian secara ekonomi harganya lebih murah dan bentuknya lebih kecil dan kompak. Sedangkan kelemahan/kekurangannya adalah penetrasi elektron ke dalam materi terbatas