

DISAIN SUMBER ELEKTRON ARUS TINGGI UNTUK MESIN BERKAS ELEKTRON SKALA INDUSTRI

Suprpto, Djoko SP., Djasiman
Puslitbang Teknologi Maju - Batan

ABSTRAK

DISAIN SUMBER ELEKTRON ARUS TINGGI UNTUK MESIN BERKAS ELEKTRON SKALA INDUSTRI. Telah dilakukan disain sumber elektron arus tinggi untuk mesin berkas elektron skala industri. Disain didasarkan pada kebutuhan arus dan profil berkas elektron saat masuk tabung akselerator. Untuk mengetahui lintasan berkas elektron di dalam sumber elektron dan saat masuk tabung akselerator dilakukan dengan simulasi. Simulasi menggunakan program yang dibuat oleh "The Andrzej Soltan Institute for Nuclear Studies, Swierk-Poland". Sumber elektron didisain menggunakan elektrode Pierce yang mempunyai sudut elektrode pemfokus $67,5^\circ$. Agar berkas elektron mendekati lurus maka tegangan anode harus sebesar 12,32 kV untuk mendapatkan arus berkas 100 mA. Untuk menghasilkan arus berkas elektron 100 mA, suhu operasi katode sekitar 2250 K dan suhu operasi ini masih jauh dibawah titik leleh yaitu 2700 K pada kevakuman $1 \cdot 10^{-6}$ Torr. Jika sumber elektron dipasang pada tabung akselerator dengan tegangan elektrode pertama 15 kV terhadap anode terjadi pemfokusan sehingga didapatkan sudut berkas elektron saat masuk tabung akselerator $-0,03^\circ$ untuk arus berkas elektron 20 mA dan $-0,04^\circ$ untuk arus berkas elektron 100 mA. Dengan sudut masuk ini diharapkan profil berkas elektron setelah keluar dari tabung akselerator tidak mengalami penyebaran yang berarti

Kata kunci : Sumber elektron, Mesin berkas elektron, Akselerator.

ABSTRACT

DESIGN OF HIGH CURRENT ELECTRON GUN FOR INDUSTRIAL ELECTRON BEAM MACHINE. The high current electron gun for industrial electron beam machine has been designed. The design is based on requirement of the electron beam current and profile at the entrance of accelerating tube. The electron beam trajectory in the electron gun and at entrance of accelerating tube were determined by simulation. The simulation is carried out by using the software made by Andrzej Soltan Institute for Nuclear Studies, Swierk-Poland. The electron gun is designed using Pierce electrode model where the focusing electrode has inclining angle of 67.5° . To obtained 100 mA paraxial electron beam, the anode voltage has to be 12.32 kV and cathode operating temperature is approximately 2250 K. This is much lower than the melting point (2700 K at $1 \cdot 10^{-6}$ Torr). If the electron gun is installed with accelerating tube, where the voltage of the first electrode is 15 kV, a focusing effect is occurred so that the entrance angle of the beam is -0.03° at 20 mA beam current and -0.04° at 100 mA beam current. It is expected that the beam divergence at the end of the accelerating tube is not significant.

Key words: Electron gun, Electron beam machine, Accelerator.

PENDAHULUAN

Mesin pemercepat elektron sering disebut MBE (Mesin Berkas Elektron) adalah satu jenis teknologi baru yang telah dikembangkan dalam dua dekade yang lalu sebagai sumber radiasi pada proses iradiasi suatu produk industri. Pemanfaatan MBE dalam bidang industri telah berkembang pesat di negara-negara maju, terutama dalam proses pengeringan pelapisan (*curing of coatings*) permukaan suatu bahan, proses pembentukan ikatan silang pada plastik, karet dan bahan isolasi kabel, proses vulkanisasi karet, sterilisasi peralatan medis, pengawetan bahan

makanan, modifikasi tekstil dan *graft polymerization*^[1,2,3,4]. Apabila dibandingkan dengan proses termal konvensional ataupun proses kimia, maka proses iradiasi elektron mempunyai beberapa keunggulan antara lain: menghasilkan kualitas produk yang lebih tinggi, tidak menimbulkan polusi pada lingkungan, hemat energi, reaksi-reaksi terjadi pada suhu kamar, proses yang terjadi mudah dikontrol, biaya operasi lebih rendah untuk produksi masal.

Khusus pemanfaatan MBE untuk proses pra vulkanisasi, ikatan silang merupakan reaksi yang paling dominan yang terjadi selama proses iradiasi elektron. Sifat-sifat fisika dari karet alam akan berubah dengan terbentuknya ikatan silang, sebagai

contoh bertambahnya ketahanan terhadap bahan pelarut (*solvent*), meningkatkan kekuatan regangan dan kekerasan, berkurangnya tingkat kemuluran dan tahan terhadap panas (*deformasi termal*)^[3,4,5].

Berdasarkan uraian tersebut di atas, perlu segera dikembangkan penguasaan teknologi MBE khususnya untuk skala industri. Mesin berkas elektron energi rendah yang digunakan di industri mempunyai rentang energi antara 150 keV s/d. 500 keV dengan arus berkas elektron antara 30 mA s/d. 300 mA^[6]. Komponen utama MBE diantaranya adalah sumber elektron yang berfungsi untuk menghasilkan berkas elektron. Berkas elektron selanjutnya dipercepat di dalam tabung akselerator dan dimayarkan di dalam corong pemayar serta dikeluarkan melalui jendela (*widow*) untuk ditembakkan pada target (bahan yang diiradiasi). Di P3TM telah dilakukan rancang bangun sumber elektron dengan kapasitas arus berkas elektron sampai 15 mA^[7]. Sumber elektron ini belum dapat digunakan untuk MBE skala industri karena besar arus berkas elektron yang dihasilkan belum memenuhi kebutuhan. Untuk memenuhi kebutuhan arus berkas elektron yang diperlukan, maka terlebih dahulu dilakukan disain sumber elektron yang dapat menghasilkan arus berkas elektron diatas 30 mA. Dalam makalah ini dibahas disain sumber elektron arus tinggi untuk mesin berkas elektron skala industri, arus berkas elektron yang dihasilkan antara 30 mA s/d. 100 mA. Hasil disain ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar pembuatan komponen-komponen sumber elektron dan konstruksinya sehingga didapatkan sumber elektron untuk mesin berkas elektron skala industri.

TEORI

Rapat Arus Elektron

Sumber elektron tipe termionik adalah sumber elektron di mana elektron dihasilkan melalui proses emisi atau pancaran termionik pada filamen panas karena dialiri arus listrik. Elektron-elektron yang dipancarkan tersebut kemudian dipercepat dengan medan elektrostatis dan dibentuk menjadi berkas elektron. Rapat arus jenuh emisi elektron (A/cm^2) sebagai fungsi suhu pemanasan besarnya mengikuti persamaan Richardson-Dushman sebagai berikut^[8]:

$$j = AT^2 e^{\left(-\frac{\phi}{kT}\right)} \quad (1)$$

dengan A adalah konstanta Richardson ($A/cm^2 K^2$), ϕ fungsi kerja (eV), k tetapan Boltzmann (eV/K)

dan T suhu pemanasan (K). Nilai A tergantung pada jenis bahan filamen (katode). Persamaan (1) merupakan persamaan yang menyatakan hubungan emisi elektron di dalam ruang sumber elektron dan suhu pemanasan filamen (katode). Agar elektron tersebut dapat dikeluarkan dari ruang sumber elektron maka diperlukan medan listrik untuk mengekstraksi dan membentuk elektron hasil emisi dari filamen (katode) menjadi berkas elektron. Jika medan listrik tersebut tidak cukup besar maka akan terjadi penumpukan elektron di depan katode sehingga terjadi awan elektron yang membentuk muatan ruang dan membatasi emisi elektron dari katode. Dalam keadaan demikian rapat arus emisi elektron disebut sebagai rapat arus emisi yang terbatas oleh muatan ruang. Besar rapat arus emisi (j_e dalam A/cm^2) ini mengikuti hukum *Child-Langmuir* sebagai berikut^[8]:

$$J_e = \chi \frac{V_a^{3/2}}{Z_{ka}^2} \quad (2)$$

dengan V_a adalah tegangan anode (V), Z_{ka} jarak katode-anode untuk susunan paralel (cm) dan χ tetapan Child ($\chi = \left(\frac{4\epsilon_0}{9}\right) \sqrt{2e/m}$), untuk elektron $\chi = 2,334 \times 10^{-6}$ Amper/Volt^{3/2}.

Emisi elektron oleh katode tergantung pada luas permukaan emisi, mode pemanasan, dan konstruksi mekaniknya (bentuk kawat, spiral atau keping).

Penentuan Elektrode Pembentuk Berkas

Di dalam MBE diharapkan berkas elektron yang keluar dari sumber elektron tidak menyebar sehingga semua berkas elektron dapat dilewatkan melalui tabung akselerator. Untuk mendapatkan agar berkas elektron tidak menyebar diperlukan susunan elektrode pembentuk berkas yang sesuai. Susunan elektrode pembentuk berkas elektron yang banyak digunakan untuk menghasilkan berkas elektron yang lurus atau hampir tidak menyebar adalah susunan elektrode Pierce yang terdiri dari katode, elektrode pemfokus dan anode^[9,10]. Susunan elektrode Pierce untuk mendapatkan aliran elektron yang lurus hampir sejajar sumbu berkas mempunyai elektrode pemfokus dengan sudut 67,5° terhadap sumbu berkas.

Penentuan Tegangan Ekstraksi

Pada sumber elektron, tegangan ekstraksi adalah tegangan yang diberikan di antara katode

(elektrode pemfokus)-anode. Untuk elektrode pemfokus dengan sudut $67,5^\circ$ agar didapatkan lintasan berkas elektron yang hampir lurus sejajar sumbu berkas (sumbu x) dan kerapatan arus elektron yang diekstraksi keluar dari sumber elektron (J_e) seragam dalam arah sumbu x serta dengan mengabaikan efek magnetik, maka tegangan ekstraksi ditentukan berdasarkan persamaan diferensial berikut^[10]:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{J_e}{\epsilon_o \sqrt{2\eta} V^{1/2}} \quad (3)$$

dengan ϵ_o adalah konstanta dielektrik (F/m), η perbandingan muatan dengan massa elektron (e/m) dan V tegangan yang diberikan pada terminal katode (elektrode pemfokus)-anode (V). Penyelesaian persamaan diferensial untuk menentukan besarnya tegangan elektrode pemfokus-anode (persamaan 3) dengan mengandaikan bahwa daerah di luar aliran elektron ($y > 0$) merupakan daerah bebas muatan yang berbatasan dengan bidang sejajar yaitu daerah aliran elektron ($y < 0$). Jika persamaan tersebut diselesaikan menggunakan fungsi analisis $x + jy$ dan syarat batas pada daerah bebas muatan diandaikan dalam bentuk bidang serta dengan mengintegrasikan, maka didapatkan^[10]:

$$V = f(x) = A x^{4/3} \quad (4)$$

dan

$$A = \left(\frac{9J_e}{4\epsilon_o (2\eta)^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (5)$$

Persamaan (4) dan (5) dapat digunakan untuk menghitung besarnya potensial yang harus dipasang pada elektrode Pierce dengan sudut elektrode pemfokus $67,5^\circ$ agar didapatkan lintasan berkas elektron yang mendekati lurus sejajar sumbu berkas.

Penentuan Perisai Radiasi Termal

Dalam sumber elektron, katode agar berfungsi untuk mengemisikan elektron dipanaskan dengan dialiri arus listrik. Akibat tingginya suhu katode maka terjadi radiasi termal di sekitar katode hingga sampai pada rumah sumber elektron yaitu tabung akselerator. Besarnya radiasi termal dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut^[11]:

$$q_{1-2} = \frac{A\sigma F_{1-2} (T_1^2 - T_2^2)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (6)$$

dengan q_{1-2} adalah laju perpindahan panas radiasi dari katode ke tabung akselerator (W), σ konstanta Stefan Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$), F_{1-2} faktor bentuk (geometri) katode dan tabung akselerator, T_1 suhu katode (K), T_2 suhu dinding tabung akselerator, ϵ_1 konstanta emisi katode dan ϵ_2 konstanta emisi dinding tabung akselerator. Laju perpindahan panas radiasi ini dapat menaikkan suhu dinding tabung akselerator dan dapat menyebabkan keretakan pada sambungan antara dinding isolator dengan elektrode tabung akselerator. Untuk meminimalkan laju perpindahan panas radiasi dapat dilakukan dengan memasang perisai radiasi termal di antara katode dan dinding tabung akselerator. Besarnya laju perpindahan panas radiasi akibat adanya perisai radiasi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut^[11]:

$$q_{1-2} = \frac{A\sigma F_{1-2} (T_1^2 - T_2^2)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1 - \epsilon_{3-1}}{\epsilon_{3-1}} + \frac{1 - \epsilon_{3-2}}{\epsilon_{3-2}}} \quad (7)$$

dengan ϵ_{3-1} adalah konstanta emisi perisai radiasi termal terhadap katode dan ϵ_{3-2} konstanta emisi perisai radiasi termal terhadap dinding tabung akselerator.

TATA KERJA

Dasar Disain

Disain sumber elektron meliputi: pemilihan bahan dan perhitungan katode, penentuan geometri komponen-komponen serta cara pengkonstruksian sumber elektron. Penentuan geometri komponen-komponen sumber elektron berkaitan dengan catu daya (tegangan dan arus listrik) untuk mencatu sumber elektron tersebut.

Pertimbangan dalam disain ini adalah:

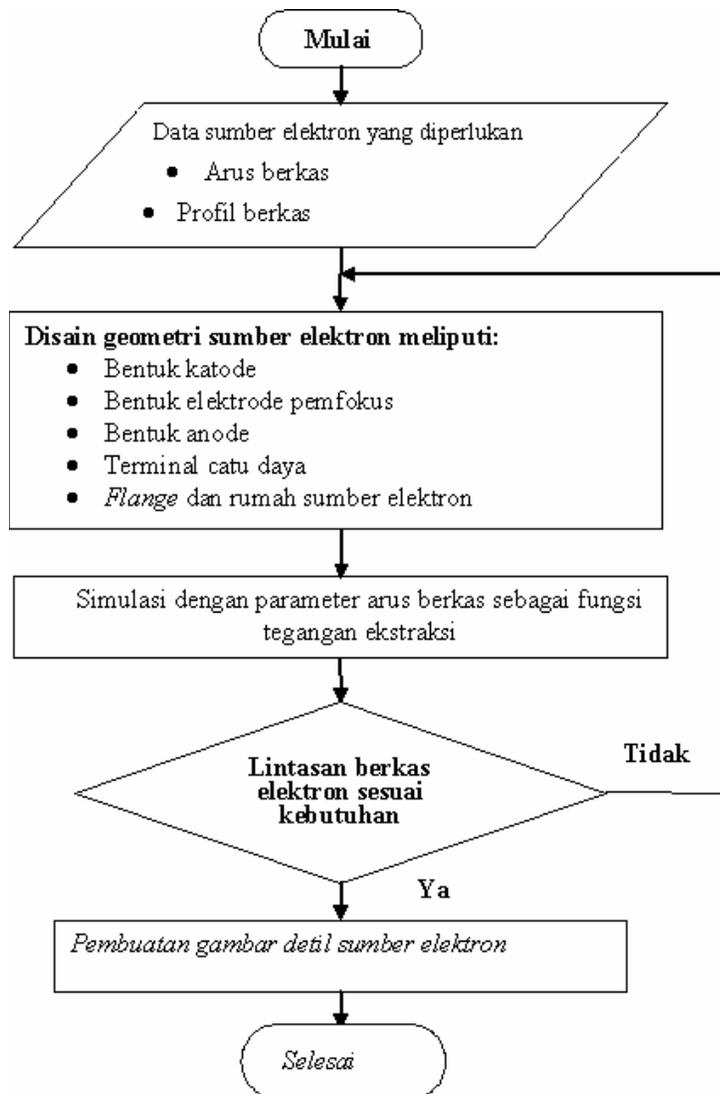
1. Fungsi dari bagian/komponen yang dirancang. Dalam hal ini, bagian-bagian/komponen-komponen yang dirancang dan setelah dibuat dapat berfungsi dengan baik sesuai yang diharapkan.
2. Cara pengerjaan dan pengkonstruksian, bagian-bagian/komponen-komponen yang dirancang harus mudah dikerjakan sesuai dengan permesinan yang digunakan. Disamping itu, mudah dalam pengkonstruksian/perakitan dengan bagian-bagian/komponen-komponen yang lain sehingga menjadi satu unit mesin/peralatan.
3. Perawatan, jika bagian atau komponen tersebut telah selesai dibuat dan dikonstruksi menjadi

satu kesatuan (unit mesin/peralatan) dapat dilakukan perawatan dengan mudah.

4. Estetika, agar unit mesin/peralatan yang dirancangkan mempunyai kerapian/keindahan sesuai dengan fungsi mesin/alat tersebut.

Dengan pertimbangan-pertimbangan tersebut dilakukan disain sesuai dengan arus dan profil berkas elektron yang diperlukan. Langkah-langkah disain ini ditunjukkan pada diagram alir (Gambar 1). Untuk menentukan geometri katode dilakukan perhitungan dengan persamaan (1) agar dapat menghasilkan arus berkas elektron maksimum sebesar 100 mA. Dari perhitungan tersebut didapatkan rapat arus jenuh elektron yang selanjutnya digunakan untuk menentukan luas permukaan

katode yang mengemisikan elektron, yaitu dengan membagi arus berkas elektron yang harus dihasilkan dengan rapat arus jenuh elektron. Geometri elektrode pemfokus ditentukan berdasarkan susunan elektrode Pierce dengan pertimbangan bahwa diameter dalam elektrode pemfokus harus cukup untuk menempat-kan katode. Penentuan *flange* sumber elektron disesuaikan dengan *flange* tabung akselerator untuk memudahkan pemasangannya. Geometri perisai radiasi termal ditentukan berdasarkan persamaan (7) untuk meminimalkan laju perpindahan panas radiasi sehingga kenaikan suhu tabung akselerator dapat diminimalkan untuk mencegah terjadinya keretakan.

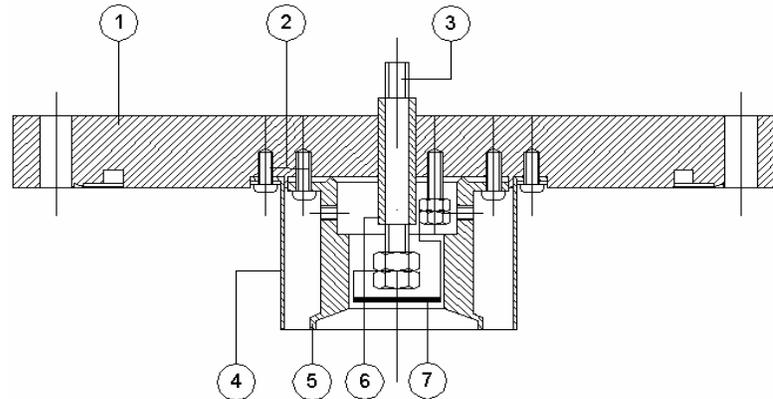


Gambar 1. Diagram alir disain sumber elektron.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam konstruksi mesin berkas elektron, berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron langsung dipercepat di dalam tabung akselerator sehingga sumber elektron dipasang langsung pada tabung akselerator. Karena itu disain *flange* dudukan elektrode pemfokus yang sekaligus sebagai *flange* sumber elektron harus sesuai dengan *flange* tabung akselerator untuk memudahkan

pemasangan. Tabung akselerator yang digunakan adalah buatan NEC – USA jenis 2 JA 004150 (NEC *Flange*). *Flange* pada tabung akselerator ini sesuai dengan *flange* untuk standar vakum DN 160 CF sehingga *flange* sumber elektron didisain dengan standar *flange* DN 160 CF. Hasil disain sumber elektron ditunjukkan pada Gambar 2 dengan spesifikasi teknis pada Tabel 1. Untuk gambar detail dan pemasangannya pada tabung akselerator ditunjukkan pada Lampiran.



Keterangan

- 1. *Flange* dudukan katode (DN 160)
- 2. Baut pengikat elektrode
- 3. Terminal catu daya filamen dan katode
- 4. Perisai radiasi termal
- 5. Elektrode pemfokus
- 6. Isolator
- 7. Katode

Gambar 2. Sumber elektron hasil disain untuk MBE skala industri.

Tabel 1. Spesifikasi teknis sumber elektron hasil disain.

Katode	Bentuk spiral, bahan kawat tungsten berdiameter 0,5 mm, panjang 20 cm dan diameter spiral (lilitan) 23 mm
Elektrode pemfokus	Bentuk kerucut (corong), bahan <i>stainless steel</i> , sudut 67,5 °, diameter luar 40 mm, diameter lubang 25 mm
<i>Flange</i>	DN 160 CF, tebal 20 mm, bahan <i>stainless steel</i>
Perisai radiasi termal	Bentuk silinder, bahan <i>stainless steel</i> , diameter luar 60 mm dan diameter lubang 62 mm

Disain sumber elektron dengan elektrode Pierce sangat penting untuk mendapatkan susunan elektrode yang tegar (*rigid*) dan pemasangan catu daya baik catu daya filamen (katode) maupun catu daya anode. Yang dimaksud susunan elektrode yang tegar adalah apabila sumber elektron tersebut dioperasikan atau dipasang pada mesin berkas elektron tidak terjadi perubahan bentuk baik pada elektrode maupun katode akibat pengaruh panas dari katode. Apabila susunan elektrode tidak tegar

dan terjadi perubahan bentuk atau posisi, maka menyebabkan lintasan berkas elektron yang dihasilkan tidak sejajar dengan sumbu dan pemfokusannya tidak tepat sebagai masukan pada sistem pemercepat (tabung akselerator). Di samping itu, untuk mencegah terjadinya loncatan listrik (*discharge*) maka bentuk katode, anode dan elektrode pemfokus dihindarkan dari bentuk ujung/tepi yang runcing dan harus dibuat dalam bentuk bulat. Hal ini disebabkan karena ujung-

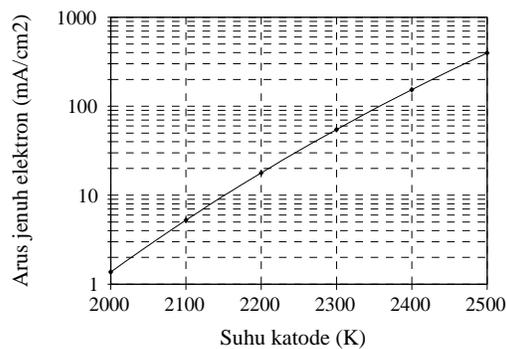
ujung yang runcing mengakibatkan timbulnya medan listrik yang besar dan apabila isolasi di antara katode, anode dan elektrode pemfokus tidak tahan terhadap medan listrik yang terpasang akan terjadi loncatan listrik (*discharge*).

Ada tiga komponen penting yaitu katode, elektrode pemfokus dan perisai radiasi termal. Katode berfungsi untuk mengemisikan (memancarkan) elektron, elektron yang diemisikan katode selanjutnya difokuskan dan didorong keluar dari sumber elektron oleh elektrode pemfokus. Agar dapat mengemisikan elektron, katode harus dipanaskan dengan dialiri arus listrik sehingga mempunyai suhu yang cukup yaitu di daerah suhu operasi katode. Karena suhu katode ini, maka elektrode pemfokus menjadi panas yang disebabkan adanya radiasi panas dari katode. Selanjutnya panas ini akan diradiasikan ke dinding tabung akselerator sehingga menyebabkan kenaikan suhu dinding tersebut. Kenaikan suhu dinding tabung akselerator dapat menyebabkan kerusakan yaitu keretakan pada sambungan antara elektrode tabung akselerator dengan dinding isolator. Untuk meminimalkan radiasi panas yang terjadi dipasang perisai radiasi termal untuk memantulkan kembali panas dari elektrode pemfokus, sehingga jumlah panas yang ditransmisikan ke tabung akselerator dan menyebabkan kenaikan suhu sangat rendah. Disain perisai radiasi termal ini didasarkan persamaan (7) dengan geometri menyesuaikan geometri katode dan tabung akselerator. Bahan perisai radiasi termal dipilih dari

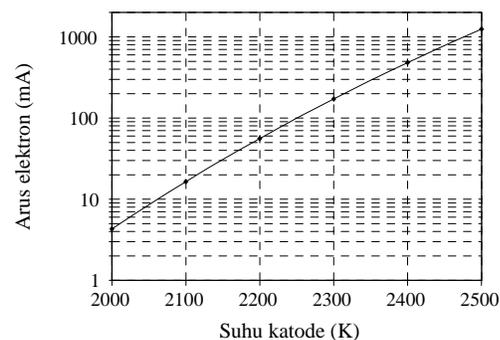
stainless steel karena mempunyai kemampuan memancarkan kembali panas yang datang cukup besar sehingga panas yang ditransmisikan rendah. Jika panas yang ditransmisikan rendah, maka laju perpindahan panas dari katode ke rumah sumber elektron atau dinding tabung akselerator rendah dan tidak memberikan kenaikan suhu yang berarti.

Perhitungan Katode

Dalam rancangan sumber elektron ini digunakan bahan katode dari tungsten (W). Untuk memprediksi suhu operasi dengan menghitung emisi elektron dari katode (emitor) sebagai fungsi suhu. Suhu operasi sangat berkaitan dengan sifat-sifat bahan pada saat dioperasikan. Satu diantara sifat yang paling penting berkaitan dengan suhu operasi katode adalah titik leleh (*melting point*). Dalam pengoperasian sumber elektron, suhu katode tidak boleh lebih tinggi dari pada titik leleh bahan katode. Hasil perhitungan untuk memprediksi suhu operasi katode dengan menggunakan persamaan 1 ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar 3.a menunjukkan hasil perhitungan hubungan antara rapat arus jenuh emisi elektron oleh katode sebagai fungsi suhu, sedangkan Gambar 3.b menunjukkan besarnya emisi arus elektron yang dihasilkan sebagai fungsi suhu. Berdasarkan persamaan 1 menunjukkan bahwa arus jenuh emisi elektron ditentukan oleh suhu katode. Makin tinggi suhu katode, makin besar arus emisi elektron.



(a)



(b)

Gambar 3. Kurva emisi elektron sebagai fungsi suhu katode. (a) Rapat arus jenuh emisi elektron sebagai fungsi suhu dan (b) Emisi arus elektron sebagai fungsi suhu.

Hal ini berkaitan dengan energi yang diberikan pada elektron untuk melepaskan dari ikatannya. Makin tinggi suhu katode, berarti makin besar energi yang diberikan kepada elektron sehingga elektron tersebut makin mudah melepaskan diri dari

permukaan katode dan akibatnya makin banyak elektron yang diemisikan. Akibat makin banyak elektron yang diemisikan, maka rapat emisi elektron makin besar. Arus emisi elektron merupakan perkalian antara rapat emisi elektron dengan luas

permukaan katode. Jadi arus jenuh emisi elektron akan makin besar jika rapat emisi elektron makin besar akibat dari makin tingginya suhu katode. Suhu operasi katode dibatasi oleh titik leleh dari bahan katode. Titik leleh bahan katode ini ditentukan pada kondisi operasi yaitu pada kondisi vakum yang cukup tinggi. Kevakuman untuk mesin berkas elektron pada umumnya berkisar di antara 10^{-2} Pa s/d. 10^{-4} Pa (10^{-4} mbar s/d. 10^{-6} mbar) atau lebih tinggi^[8]. Makin tinggi tingkat kevakumannya, makin baik untuk kondisi operasi mesin berkas elektron. Karena pada tingkat kevakuman yang makin tinggi gangguan pada lintasan berkas elektron dan efek *sputtering* yang terjadi lebih kecil. Tingkat kevakuman sumber elektron sama dengan tingkat kevakuman mesin berkas elektron, maka titik leleh katode ditentukan pada tingkat kevakuman ini. Titik leleh katode dari bahan tungsten adalah 3.050 K untuk kevakuman $1 \cdot 10^{-4}$ Torr dan 2.700 K untuk kevakuman $1 \cdot 10^{-6}$ Torr (1 Torr sama dengan 1,33 mbar).^[12] Berdasarkan perhitungan untuk memperkirakan suhu operasi katode didapatkan bahwa suhu katode sebesar 2.200 K untuk emisi arus elektron 55,98 mA dan 2.300 K untuk emisi arus elektron 171,73 mA (Gambar 3.b). Jadi dengan suhu operasi ini, katode dari bahan tungsten untuk sumber elektron dengan arus berkas antara 20 mA s/d. 100 mA diharapkan dapat berfungsi dengan baik. Hal ini disebabkan karena suhu operasi untuk menghasilkan emisi arus elektron yang diperlukan masih jauh di bawah titik leleh pada kondisi tingkat kevakuman saat mesin berkas elektron beroperasi yaitu di antara (10^{-4} - 10^{-6}) mbar.

Simulasi Sumber Elektron Hasil Disain

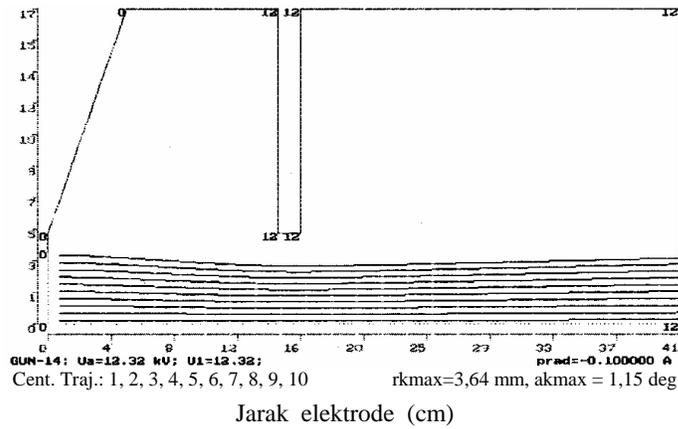
Simulasi dilakukan dengan memasukkan data-data spesifikasi teknis dan tegangan elektrode pemfokus-anode ke dalam program perhitungan dan pelukisan lintasan berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron. Program ini buatan Andrzej Soltan Institute for Nuclear Studies, Swierk, Poland khusus untuk perhitungan dan pelukisan lintasan berkas elektron dari sumber elektron dengan elektrode Pierce menggunakan bahasa *Fortran* dan *Turbo Pascal*. Bahasa *Fortran* digunakan untuk program perhitungan lintasan berkas elektron yang dipengaruhi oleh kecepatan akibat energi termal, penyebaran akibat muatan ruang, pemfokusan dan penambahan kecepatan akibat bidang ekuipotensial yang dibentuk oleh elektrode Pierce, sedangkan bahasa *Pascal* digunakan untuk melukiskan lintasan berkas elektron dengan data-data hasil perhitungan menggunakan bahasa *Fortran*^[13].

Untuk tegangan elektrode pemfokus-anode (ekstraksi) yang dipasang agar didapatkan lintasan berkas hampir lurus sejajar dengan sumbu *x* dihitung untuk arus berkas 100 mA berdasarkan persamaan (4) dan (5). Hasil perhitungan untuk arus berkas elektron 100 mA didapatkan tegangan ekstraksi 12,32 kV. Hasil perhitungan ini digunakan sebagai dasar simulasi untuk sumber elektron sebelum digabungkan dengan tabung akselerator dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil simulasi untuk arus berkas 100 mA pada tegangan ekstraksi 12,32 kV didapatkan berkas elektron mendekati lurus sejajar sumbu dengan jari-jari berkas pada target yang berjarak 25 mm dari anode 3,94 mm. Namun di dekat anode terjadi sedikit pemfokusan yang disebabkan karena efek pemfokusan oleh bidang ekuipotensial yang dibentuk oleh elektrode pemfokus-anode. Setelah melewati celah anode profil berkas terjadi penyebaran yang disebabkan adanya muatan ruang sehingga terjadi gaya tolak-menolak dan gerakan dalam arah radial serta tidak adanya pemfokusan.

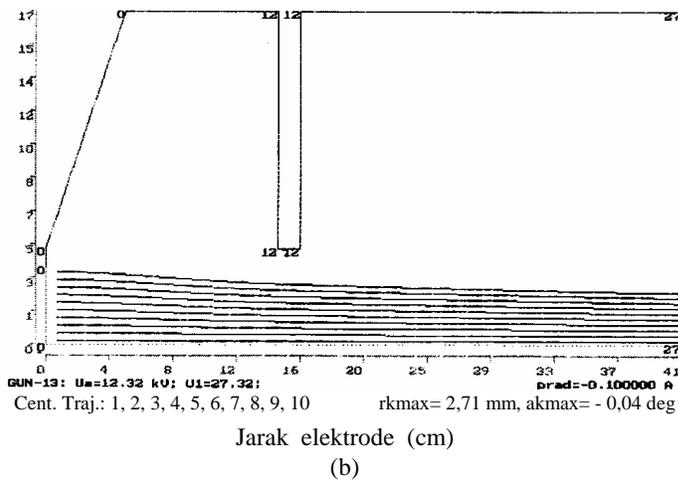
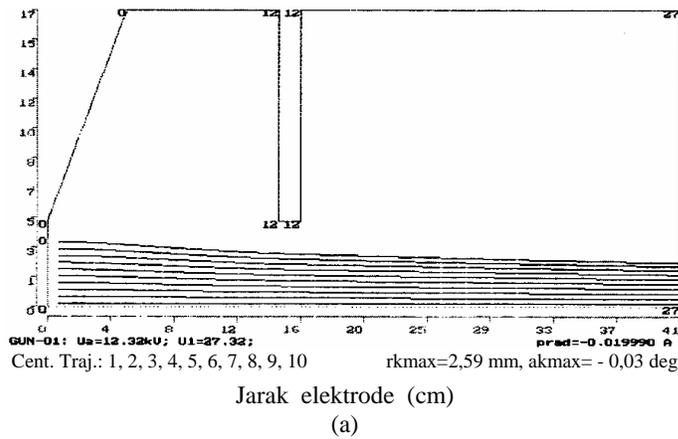
Dalam konstruksi mesin berkas elektron, sumber elektron dirakit dengan tabung akselerator, maka berkas elektron setelah melewati celah anode dimasukkan ke dalam elektrode pertama tabung akselerator. Akibatnya elektrode pertama tabung akselerator merupakan target berkas elektron. Disamping itu pengoperasian sumber elektron dimulai dengan arus berkas rendah hingga mencapai maksimum yaitu 100 mA, maka dilakukan simulasi mulai arus berkas 20 mA sampai 100 mA dengan kelipatan 20 mA yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5. Simulasi ini untuk mengetahui lintasan berkas elektron yang terjadi akibat pengaruh arus berkas elektron lebih kecil dari perhitungan dan sekaligus untuk mengetahui lintasan berkas elektron setelah sumber elektron dirakit dengan tabung akselerator. Karena hasil simulasi tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan untuk kenaikan arus berkas dari 20 mA sampai 100 mA, maka hanya ditampilkan hasil simulasi untuk arus berkas 20 mA dan 100 mA. Simulasi dilakukan untuk tegangan ekstraksi 12,32 kV dan tegangan anode-elektrode pertama tabung akselerator 15 kV, sehingga beda tegangan antara elektrode pemfokus dan elektrode pertama tabung akselerator sebesar 27,32 kV. Dengan tegangan ini menunjukkan adanya efek pemfokusan di antara anode dan elektrode pertama tabung akselerator. Efek pemfokusan disebabkan adanya beda potensial antara elektrode pertama tabung akselerator dengan anode sehingga mempengaruhi bentuk bidang ekuipotensial di sekitar anode dan meningkatkan energi berkas elektron dari sumber elektron sehingga berkas elektron menjadi lebih tegar (*rigid*). Karena besarnya beda potensial antara elektrode

pemfokus-anode dengan anode-elektrode pertama tabung akselerator hanya 2,68 kV maka tidak terjadi

efek pemfokusan yang kuat.



Gambar 4. Lintasan berkas elektron untuk tegangan anode = target 12,32 kV.



Gambar 5. Lintasan berkas elektron untuk tegangan ekstraksi 12,32 kV dan target 27,32 kV. (a) Arus berkas elektron 20 mA dan (b) arus berkas elektron 100 mA.

Hasil simulasi (Gambar 5) menunjukkan bahwa kondisi berkas elektron saat masuk tabung akselerator mempunyai jari-jari 2,59 mm dengan sudut masuk - 0,03° untuk arus berkas 20 mA dan jari-jari 2,71 mm dengan sudut masuk - 0,04° untuk arus berkas 100 mA. Dengan efek pemfokusan ini dihasilkan lintasan berkas elektron dari sumber elektron cukup baik untuk masukan tabung akselerator. Hal ini disebabkan karena kondisi saat masuk tabung akselerator hampir lurus sejajar sumbu berkas dan hanya sedikit pemfokusan yaitu dengan sudut - 0,03° untuk arus berkas 20 mA dan sudut - 0,04° untuk arus berkas 100 mA. Dengan sudut masuk ini diharapkan lintasan berkas elektron dapat dipercepat dalam tabung akselerator dan didapatkan profil berkas elektron setelah keluar dari tabung akselerator tidak mengalami penyebaran yang berarti.

KESIMPULAN

Dari hasil disain yang dilanjutkan dengan simulasi lintasan berkas elektron dapat disimpulkan bahwa sumber elektron didisain dengan elektrode Pierce yang mempunyai sudut elektrode pemfokus 67,5 °, agar berkas elektron mendekati lurus didapatkan tegangan anode 12,32 kV pada arus berkas 100 mA. Untuk menghasilkan arus berkas elektron 100 mA, suhu operasi katode sekitar 2250 K dan suhu operasi ini masih jauh dibawah titik leleh yaitu 2700 K pada kevakuman $1 \cdot 10^{-6}$ Torr. Lintasan berkas elektron untuk sumber elektron dipasang pada tabung akselerator dengan tegangan elektrode pertama 15 kV terhadap anode, terjadi pemfokusan sehingga sudut berkas elektron saat masuk tabung akselerator - 0,03 ° untuk arus berkas elektron 20 mA dan - 0,04 untuk arus berkas elektron 100 mA. Dengan sudut masuk ini diharapkan profil berkas elektron setelah keluar dari tabung akselerator tidak mengalami penyebaran yang berarti.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Marian PACHAN, W. DRABIK M.Sc. yang telah membimbing training dan IAEA yang telah memberikan kesempatan untuk training (*fellowship program*) di Andrzej Soltan Institute for Nuclear Studies, Swierk, Poland.

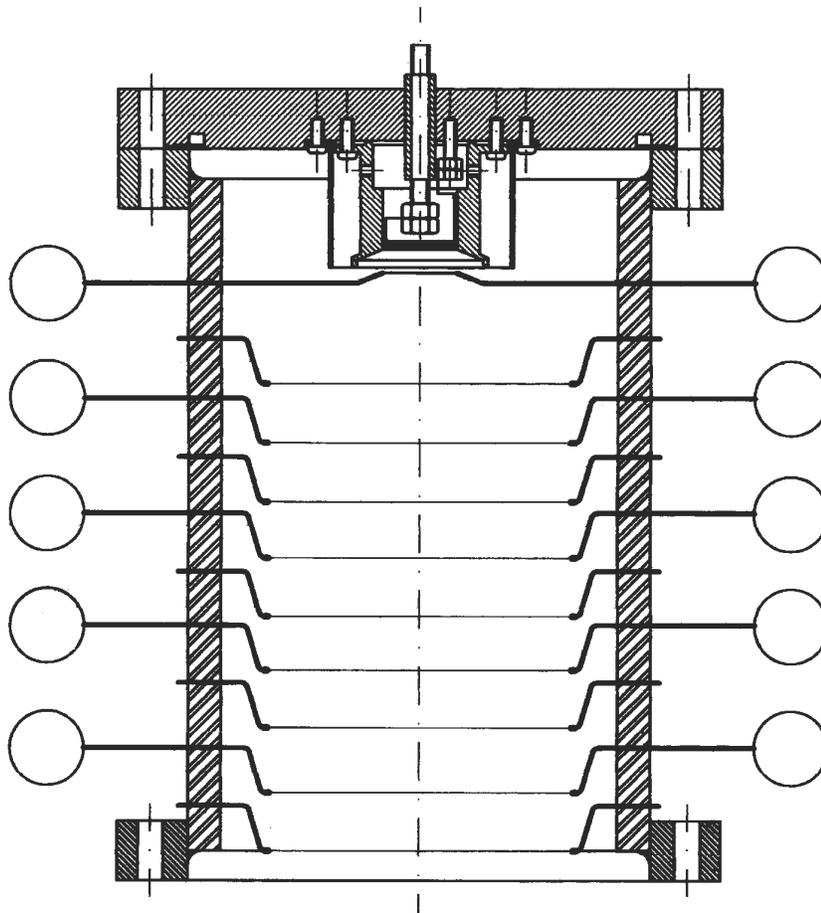
DAFTAR PUSTAKA

- [1] QIZHANG, Z., *Electron Accelerators Manufactured in China*, UNDP/IAEA/RCA Regional Training Course on EB Irradiation Technology, Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, 1991.
- [2] SUZUKI, M., *Recent Advances in High Energy Electron Beam Machine*, Nissin-High Voltage Co., Ltd., Proceedings of the Workshops on the Utilization of Electron Beams, JAERI-M, 90-194, 1990.
- [3] YAMAMOTO, S., *Crosslinking of Wire and Cables with Electron Beam*, Proceedings of the Workshops on the Utilization of Electron Beams, JAERI-M, 90-194, 1990.
- [4] MAKUUCHI, K., *Electron Beam Processing of Rubbers*, Proceedings of the Workshops on the Utilization of Electron Beams, JAERI-M, 90-194, 1990.
- [5] MERI SUHARINI, *Vulkanisasi Lateks Karet Alam Secara Batch Dengan Iradiasi Berkas Elektron*, PPI Aplikasi radiasi, P3TIR-BATAN, 2002.
- [6] SCHRAF, W., WIESZCZYCKA, W., *Particle Accelerators for Industrial Processing*, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 1999.
- [7] SUPRAPTO, DJOKO SP DAN DJASIMAN, *Peningkatan Kinerja Sumber Elektron Termionik dengan Elektroda Pierce Untuk MBE P3TM-BATAN*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Puslitbang Teknologi Maju, BATAN, Yogyakarta, 2002.
- [8] SCHILLER, S., *et. al.*, *Electron Beam Technology*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1982.
- [9] FORRESTER, *et. al.*, *Large Ion Beams*, Fundamentals of Generation and Propagation, John Wiley & Sons Inc., New York, 1986.
- [10] PIERCE, J.R., *Theory and Design of Electron Beams*, D. Van Nostrand Company. Inc, New York, 1954.
- [11] INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., *Fundamentals of Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York, 1981.

[12] ROTH, A., *Vacuum Technology*, North-Holland Publishing Company, New York, 1979.

[13] PACHAN M., W. DRABIK M.Sc. *Konsultasi Pribadi*, di the Andrzej Soltan Institute for Nuclear Studies, Swierk, Poland, 1999.

Lampiran 1. Gambar detil sumber elektron.



TANYA JAWAB

Riyanto Setyo Oetomo

- Berapa umur pakai dari katode sumber elektron tersebut ?
- Berapa tingkat kestabilan arus elektron yang dihasilkan.

Suprpto

- Menurut perhitungan umur katode sekitar 1.000 jam.
- Kestabilan arus berkas elektron tergantung dari suhu katode, suhu ini sangat dipengaruhi oleh kestabilan catu daya katode (arus filamen) dan laju perpindahan panas dari katode ke lingkungan.

Utaya

- Bagaimana cara menghitung koefisien bentuk ($F_{0.1}$) untuk benda berbentuk spiral pada filamen?
- Bagaimana atau metode apa yang dipakai untuk menghitung medan antara filamen dengan reflektor?

Suprpto

- Dalam disain perisai radiasi termal tidak dihitung secara detil, namun dilakukan penyesuaian bentuk antara katode, elektrode pemfokus (reflektor) dan rumah sumber elektron. Jadi koefisien bentuk ($F_{0.1}$) tidak dihitung.
- Untuk menghitung medan didasarkan geometri elektrode pemfokus dan anode dengan persamaan (4) dan (5).