

MODIFIKASI SUMBER ELEKTRON DAN SIMULASI LINTASAN BERKAS ELEKTRON PADA TABUNG PEMERCEPAT MBE DI PSTA

Suprpto, Darsono, Elin Nuraeni, Taufik

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN

ABSTRAK

MODIFIKASI SUMBER ELEKTRON DAN SIMULASI LINTASAN BERKAS ELEKTRON PADA TABUNG PEMERCEPAT MBE DI PSTA. Telah dilakukan modifikasi sumber elektron dan simulasi lintasan berkas elektron. Sumber elektron merupakan bagian utama dari mesin berkas elektron yang berfungsi untuk membangkitkan elektron dan dibentuk menjadi berkas elektron, berkas elektron selanjutnya dipercepat di dalam tabung akselerator. Modifikasi sumber elektron dan simulasi lintasan berkas elektron dilakukan dengan tahapan: perhitungan ulang emisi dan ekstraksi elektron, simulasi dan analisis lintasan berkas. Simulasi berkas elektron menggunakan program Opera 3 D dengan beberapa konfigurasi antara lain: (i) katode, elektrode pemfokus dan kedudukan anode dihubungkan (anode dilepas), (ii) katode dan elektrode pemfokus dihubungkan serta anode dipasang dengan variasi tegangan ekstraksi atau tegangan katode-anode pada 5 kV, 10 kV dan 15 kV. Dari hasil modifikasi sumber elektron dan simulasi lintasan berkas elektron diperoleh bahwa perhitungan ulang emisi elektron dapat mencapai arus berkas elektron 55,98 mA pada suhu operasi katode 2200 K dan untuk arus berkas elektron 171,7 mA pada suhu operasi katode 2300 K. Simulasi lintasan berkas elektron mulai dari sumber elektron sampai keluar tabung akselerator tidak terjadi tumbukan antara berkas elektron dan elektrode tabung akselerator, walaupun untuk tegangan katode-anode 5 kV dan 10 kV lintasan berkas elektron terjadi titik fokus dan persilangan dengan sumbu berkas serta menyebar kembali. Tetapi untuk tegangan katode-anode 15 kV, lintasan berkas elektron terfokus dan tidak terjadi persilangan dengan sumbu berkas.

Kata kunci: sumber elektron, lintasan berkas elektron, mesin berkas elektron.

ABSTRACT

MODIFICATION OF ELECTRON GUN AND SIMULATION OF ELECTRON BEAM TRAJECTORY ON ACCELERATING TUBE IN EBM-CAST. A modification of electron gun and simulation of electron beam trajectory simulation has been done. The electron gun is the main part of the electron beam machine (EBM) that serves to excite electrons that formed into an electron beam and will be accelerated in the accelerator tube. The steps of modification of the electron gun and electron beam trajectories simulations comprise of electron emission and extraction recalculation, simulation and analysis of the electron beam trajectory. The simulation of electron beam trajectory using Opera 3 D program with several configurations include: (i) the cathode, focusing electrode and anode holder (anode removed) connected, (ii) the cathode, focusing electrode and anode electrodes fitted with variation of extraction voltage or cathode-anode voltage on 5 kV, 10 kV and 15 kV. The result of electrons gun modification and electron beam trajectories simulations show that the recalculation electron emission can produce electron beam current up to 55.98 mA at the cathode operating temperature of 2200 K and up to 171.7 mA at the cathode operating temperature of 2300 K. The simulation of electron beam trajectory from the electron gun to the end of accelerator tube show that there are no collision between electron beam and accelerator tube electrode, even though the beam are cross over for 5 kV and 10 kV of cathode-anode voltage. But for cathode-anode voltage of 15 kV, the electron beam trajectory is focused and not occurred intersection with the axis beam.

Keywords: electron gun, electron beam trajectory, electron beam machine

PENDAHULUAN

Mesin pemercepat elektron sering disebut Mesin Berkas Elektron (MBE) adalah jenis teknologi yang telah dikembangkan dalam tiga dekade yang lalu sebagai sumber radiasi (iradiator) pada proses iradiasi suatu produk industri. Pemanfaatan MBE dalam bidang industri telah berkembang pesat. Pemanfaatan MBE ini dikenal sebagai *cross-linking* polimer, perlakuan panas (pengerasan permukaan), perlakuan peralatan medis (kedokteran) dan pengawetan makanan [1]. Proses

cross-linking polimer digunakan untuk membuat bahan yang digunakan untuk produk seperti *shrink wrap*, isolasi kabel, busa plastik, hidrogel, vulkanisasi karet dan material komposit yang digunakan dalam mobil dan pesawat manufaktur. Proses perlakuan panas (pengerasan permukaan) dengan memanaskan permukaan logam paduan (mampu keras/*hardenable*) hingga suhu tertentu kemudian didinginkan secara cepat sehingga bahan menjadi keras. Proses perlakuan peralatan medis (kedokteran) dan pengawetan makanan, iradiasi elektron digunakan untuk membunuh mikroba tanpa merusak peralatan atau

kemasan dan biasa disebut sterilisasi. Proses iradiasi elektron mempunyai beberapa keuntungan antara lain: dapat diaktifkan hanya jika diperlukan, tidak memerlukan penambahan sumber radioaktif seperti halnya kobalt-60 dan tidak ada limbah radioaktif [2].

Berdasarkan uraian tersebut, perlu dikembangkan penguasaan teknologi MBE khususnya untuk industri lateks yang digunakan untuk pra vulkanisasi. Ada 3 (tiga) klasifikasi energi pada MBE yaitu energi tinggi, energi menengah dan energi rendah. Untuk energi rendah yang digunakan di industri mempunyai rentang energi antara 150 keV s/d. 500 keV [3]. 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 (*window*) untuk ditembakkan pada target (bahan yang diiradiasi). Penggunaan sumber elektron tidak hanya untuk MBE tetapi juga peralatan *microwave* (seperti klystron, gyrotron) [4] dan untuk pengelasan dengan teknik berkas elektron [5] serta TV, SEM, TEM, *X-ray* dan akselerator elektron [6]. Untuk pengelasan dengan teknik berkas elektron yaitu dengan memanfaatkan energi kinetik berkas elektron yang menumbuk material dan diubah menjadi panas [5]. Untuk pengembangan sumber elektron yang dapat menghasilkan berkas elektron dengan intensitas dan kualitas tidak mudah. Parameter intensitas dan kualitas berkas seperti: arus, diameter (profil) dan lintasan berkas elektron [7]. Untuk memenuhi kebutuhan ini perlu dilakukan [4]: (i) simulasi rancangan dengan bantuan komputer (*CAD/computer-aided design*) dan perhitungan menggunakan program untuk merancang sumber elektron dan sistem optiknya walaupun terdapat banyak perbedaan antara rancangan dan pekerjaan yang sebenarnya dan (ii) penentuan kinerja berkas elektron walaupun hanya terbatas pada percobaan tingkat emisi dan transmisi. Rancangan sumber elektron untuk operasi suhu rendah dengan elektrode Pierce dan katode oksida, berdasarkan persamaan Richardson-Dushman dapat dioperasikan pada suhu sekitar 700 °C [8].

Di PSTA telah dilakukan rancang bangun sumber elektron didasarkan elektrode Pierce dengan kapasitas arus berkas elektron sampai 55 mA untuk MBE (untuk pra vulkanisasi lateks) [9]. Mesin berkas elektron tersebut direncanakan mempunyai keluaran arus berkas elektron 20 mA, sehingga sumber elektron yang digunakan harus mempunyai arus berkas elektron lebih besar dari 20 mA. Jika didasarkan kebutuhan arus berkas elektron yang dapat diekstraksi dari sumber elektron sudah mencukupi karena sumber elektron tersebut sudah dapat mengeluarkan berkas elektron 55 mA. Namun didasarkan dari hasil pengujian setelah dirakit menjadi satu kesatuan pada MBE dihasilkan berkas elektron yang tidak sejajar dengan sumbu sehingga dimungkinkan sebagian besar berkas menumbuk dinding corong pemayar dan flens jendela

sehingga tidak sampai ke target. Berkas elektron yang menumbuk flens energinya akan terdispersi menjadi panas dan akan merusakkan pada bagian yang ditumbuk. Untuk kebutuhan ini maka dilakukan peningkatan kualitas berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron dengan melakukan modifikasi dan simulasi lintasan berkas elektron dari sumber elektron sampai tabung akselerator agar dapat dihasilkan berkas elektron yang mempunyai kualitas lebih baik yaitu berkas elektron terfokus dan mempunyai lintasan berkas sejajar dengan sumbu. Jika berkas elektron dari sumber elektron tidak terjadi penyebaran dan terfokus dengan lintasan sejajar sumbu maka berkas elektron tersebut dapat dipercepat hingga mempunyai energi sesuai dengan tegangan pemercepatnya dan tidak menumbuk elektrode pemercepat, dinding corong pemayar dan flens dari jendela sehingga berkas elektron tersebut sampai pada target.

TEORI

Rapat Arus Elektron

Sumber elektron tipe termionik adalah sumber elektron di mana elektron dihasilkan melalui proses emisi atau pancaran termionik dari filamen panas karena dialiri arus listrik. Elektron-elektron yang dipancarkan tersebut kemudian diekstraksi/dipercepat dengan medan elektrostatik 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, 10, 11]:

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

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 tegangan listrik yang harus dipasang pada katode-anode agar terbentuk medan listrik untuk mengesktraksi berkas elektron adalah ditentukan berdasarkan persamaan diferensial berikut [10]:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{J_e}{\epsilon_o \sqrt{2\eta V}^{1/2}} \tag{2}$$

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 besar tegangan elektrode pemfokus-anode (persamaan 2) 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]:

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

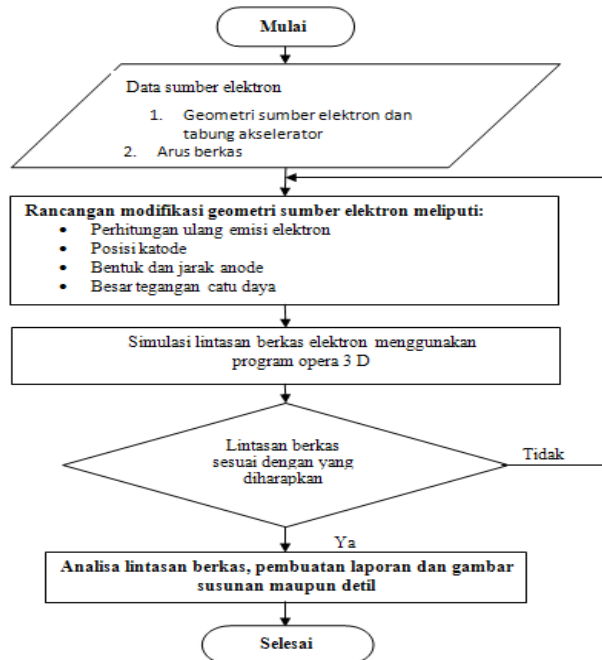
dan

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

Persamaan (3) dan (4) 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.

TATA KERJA

Untuk modifikasi dan simulasi agar dihasilkan berkas elektron yang terfokus dan mempunyai lintasan berkas sejajar dengan sumbu dilakukan dengan tahapan: perhitungan ulang emisi dan ekstraksi elektron, simulasi dan analisis lintasan berkas serta disain geometri katode (elektrode Pierce). Setelah perhitungan emisi elektron maka dilakukan simulasi dan analisis lintasan berkas elektron di dalam tabung akselerator selama proses pemercepatan. Untuk simulasi, sumber elektron digabungkan dengan tabung akselerator jenis *general purpose acceleration tube* tipe 2 JA 004150 (*NEC Flanges*). Simulasi berkas elektron menggunakan program Opera 3 D dengan beberapa konfigurasi antara lain: (i) katode, elektrode pemfokus dan kedudukan anode dihubungkan (anode dilepas), (ii) katode dan elektrode pemfokus dihubungkan serta anode dipasang dengan variasi tegangan ekstraksi atau tegangan katode-anode pada 5 kV, 10 kV dan 15 kV. Tegangan pemercepat untuk mempercepat berkas elektron pada semua simulasi ini adalah 300 kV. Diagram alir modifikasi dan simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 1. Program opera 3 D juga telah digunakan untuk desain dan simulasi sumber elektron *multi beam* pada Klystron [12]. Dari hasil simulasi menggunakan opera 3 D dilanjutkan penentuan geometri sumber elektron dan pembuatan gambar susunan maupun detil sehingga dapat digunakan untuk acuan dalam konstruksi sumber elektron.



Gambar 1. Diagram alir modifikasi dan simulasi lintasan berkas elektron.

HASIL DAN PEMBAHASAN

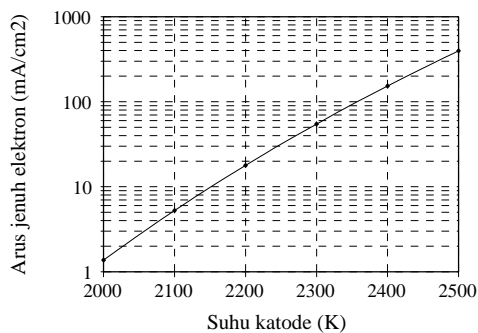
Untuk modifikasi sumber elektron dan simulasi lintasan berkasnya, berkas elektron yang dihasilkan sumber elektron langsung dipercepat di dalam tabung akselerator sehingga sumber elektron digabungkan dengan tabung akselerator. Karena itu *flange* dudukan elektrode pemfokus yang sekaligus sebagai *flange* 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 mendekati dengan *flange* untuk standar vakum DN 160 CF sehingga *flange* sumber elektron dibuat dengan standar *flange* DN 160 CF dan disesuaikan dengan *flange* tabung akselerator [9].

Perhitungan ulang dilakukan secara analitis untuk menentukan kemampuan emisi elektron oleh katode. Elektron yang diemisikan selanjutnya diekstraksi menjadi arus berkas elektron dan dipercepat di dalam tabung akselerator. Emisi elektron per satuan luas katode sangat dipengaruhi oleh suhu operasi dan sifat bahan katode, untuk sumber elektron ini katode dibuat dari bahan kawat tungsten (W) berdiameter 0,5 mm dan dibentuk spiral dengan diameter sperial 15 mm. Untuk memprediksi suhu operasi dilakukan dengan menghitung emisi elektron dari katode (emitor) sebagai fungsi suhu. Satu diantara sifat yang paling penting berkaitan dengan suhu operasi adalah titik leleh (*melting point*). Dalam pengoperasian sumber elektron, suhu katode tidak boleh lebih tinggi dari pada titik lelehnya.

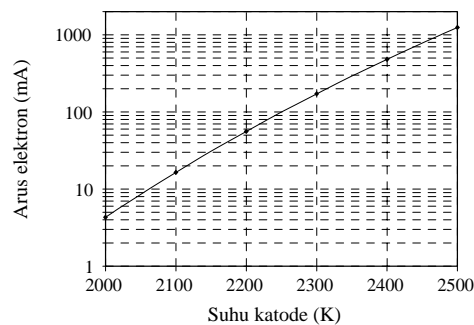
Hasil perhitungan untuk memprediksi suhu operasi dengan menggunakan persamaan (1) ditunjukkan pada Gambar 2, karena material dan geometri katoda sama dengan sumber elektron sebelumnya maka hasil perhitungan mendekati sama sehingga kurva hasil perhitungan mengacu pada perhitungan sebelumnya. Gambar 2.a menunjukkan hasil perhitungan hubungan antara rapat emisi elektron sebagai fungsi suhu, sedangkan Gambar 2.b menunjukkan besar emisi arus elektron yang dihasilkan sebagai fungsi suhu. Emisi arus elektron

merupakan perkalian rapat emisi elektron dengan kulit katode (filamen) yang mengemisikan elektron. Hasil perhitungan berdasarkan persamaan (1) menunjukkan bahwa arus jenuh emisi elektron ditentukan oleh suhu katode dan berbanding lurus sehingga makin tinggi suhu katode, makin besar arus emisi elektron. 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 dari ikatannya (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.

Berdasarkan perhitungan untuk memperkirakan suhu operasi didapatkan bahwa pada suhu katode 2.200 K dapat mengemisikan arus elektron 55,98 mA dan 2.300 K dapat mengemisikan arus elektron 171,7 mA (Gambar 2.b). Jadi dengan suhu operasi ini, katode dari bahan tungsten (W) untuk sumber elektron dengan luaran arus berkas elektron sampai dengan 50 mA diharapkan dapat berfungsi dengan baik [9]. Pada desain dan analisis yang telah dilakukan menggunakan EGN2w dan CST-*Particle Studio codes*, bahan katode yang digunakan LaB₆ dengan suhu operasi 2.000 K untuk menghasilkan emisi arus berkas elektron 226,88 mA (CST-*Particle Studio codes*) dan 228,58 mA (EGN2w) dicapai pada tegangan katode 20 kV [13]. Berdasarkan acuan dan jika dibandingkan dengan perhitungan ini terjadi perbedaan suhu operasi katode, perbedaan suhu ini disebabkan oleh perbedaan bahan katode yaitu untuk perhitungan ini menggunakan tungsten (W) dan untuk acuan menggunakan lanthanum hexaboride (LaB₆). Perbedaan yang mendasar untuk kedua bahan tersebut adalah konstanta emisi yaitu konstanta Richardson dan fungsi kerja (*work function*) yang mempengaruhi jumlah elektron yang dapat diemisikan sebagai fungsi suhu operasi.



a. Rapat arus jenuh emisi elektron

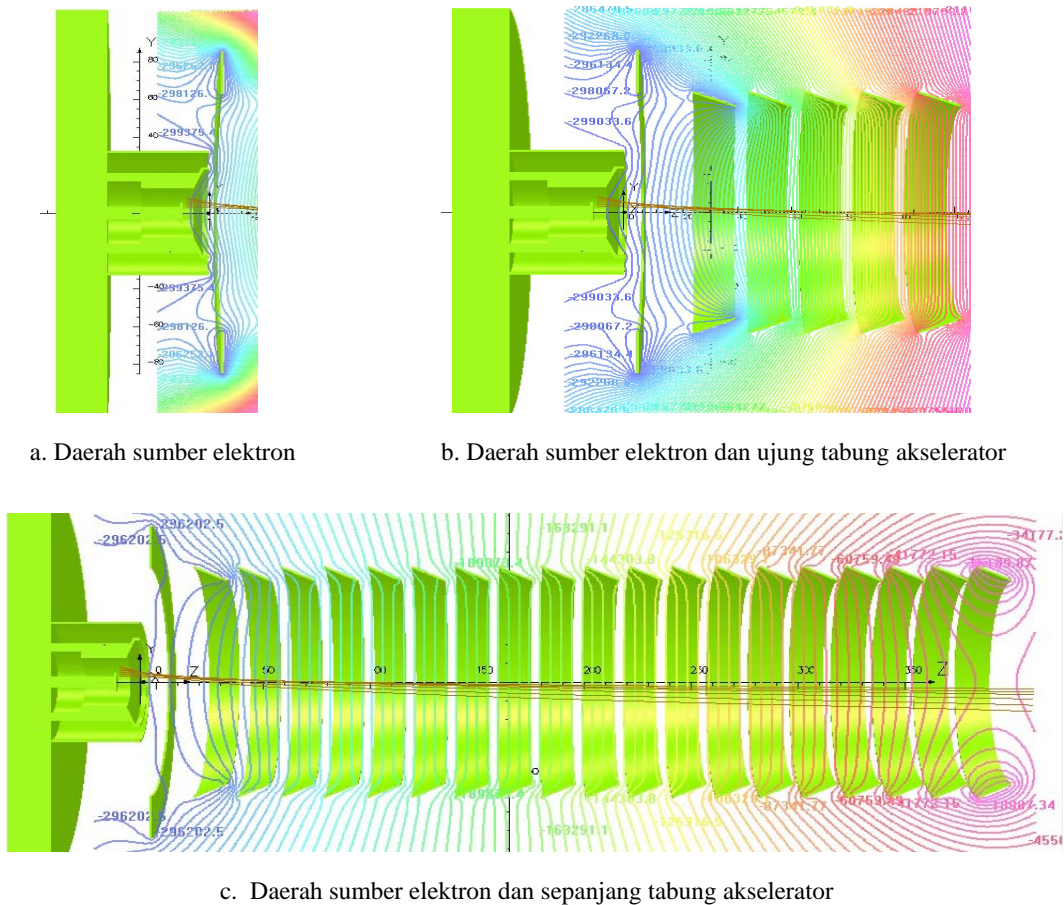


b. Emisi arus elektron

Gambar 2. Kurva emisi elektron sebagai fungsi suhu katode [9].

Setelah perhitungan emisi elektron dilanjutkan simulasi dan analisis lintasan berkas elektron baik di dalam sumber elektron maupun tabung akselerator selama proses percepatan. Simulasi lintasan berkas elektron dilakukan dengan program Opera 3 D. Pada simulasi lintasan berkas elektron pada penelitian ini adalah untuk menggambarkan bidang equipotensial yang terbentuk dan lintasan berkas elektron dari sumber elektron sampai tabung akselerator. Lintasan berkas elektron digambarkan mulai saat elektron diemisikan dari katode sampai keluar tabung akselerator menuju tabung hanyut (*drive tube*). Hasil simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 6. Simulasi dilakukan pada tegangan pemercepat 300 kV dan posisi filamen 3 mm dari pangkal elektrode pemfokus atau 9 mm dari ujung elektrode pemfokus. Pada Gambar 3 ditunjukkan hasil simulasi lintasan berkas elektron setelah diekstraksi dari dalam sumber elektron dan dipercepat di dalam tabung akselerator pada kondisi anode tidak dipasang. Pada kondisi ini: katode, elektrode pemfokus dan dudukan anode dihubungkan dengan tegangan negatif

dari tegangan pemercepat serta sebagai pengganti anode adalah elektrode pertama tabung akselerator. Dari simulasi tersebut diperoleh lintasan berkas elektron keluar dari sumber elektron terjadi pemfokusan hingga masuk ke dalam tabung akselerator untuk dipercepat. Terjadinya pemfokusan saat berkas elektron keluar dari sumber elektron diakibatkan oleh bidang equipotensial akibat medan listrik yang digunakan untuk mengekstraksi, memfokuskan dan mempercepat elektron yang dikeluarkan dari sumber elektron. Arah ekstraksi dan percepatan berkas elektron selalu tegak lurus terhadap bidang equipotensial sehingga arah percepatan di daerah katode dan elektrode pemfokus mengarah ke sumbu berkas dan terjadi pemfokusan berkas elektron. Pada simulasi, lintasan berkas elektron hanya digambarkan untuk satu sisi karena sisi atas dan sisi bawah adalah simetri (di daerah sumber elektron hanya digambarkan untuk sisi atas, setelah terjadi perpotongan dengan sumbu berkas di dalam tabung pemercepat digambarkan untuk sisi bawah).



Gambar 3. Lintasan berkas elektron dan bidang equipotensial untuk katode-anode dihubungkan (anode menggunakan terminal elektrode pemercepat).

Pada saat elektron diemisikan oleh katode (filamen) mempunyai energi yang relatif kecil, energi ini dibangkitkan oleh pemanasan filamen yaitu tetapan Boltzmann (k) kali suhu pemanasan (T) atau kT (eV). Dengan energi ini elektron sangat mudah diarahkan dalam ekstraksi dan pemercepatannya. Pada Gambar 3.a ditunjukkan garis bidang equipotensial dan lintasan berkas elektron di sekitar katode sampai dengan keluar dari sumber elektron, sedangkan pada Gambar 3.b ditunjukkan garis bidang equipotensial dan lintasan berkas elektron di sekitar katode sampai pada sisi masuk tabung akselerator. Untuk Gambar 3.c ditunjukkan garis bidang equipotensial dan lintasan berkas elektron mulai di sekitar katode sampai dengan keluar tabung akselerator. Garis bidang equipotensial ditunjukkan oleh garis-garis melintang dan dibentuk oleh bentuk geometri elektrode pemfokus dan elektrode tabung akselerator. Untuk lintasan berkas elektron digambarkan oleh garis-garis searah dengan sumbu Z. Berkas elektron sepanjang lintasannya yaitu di dalam sumber elektron maupun di dalam tabung akselerator mendapat tambahan energi. Di dalam sumber elektron, tambahan energi diperoleh dari tegangan yang dipasang diantara elektrode pemfokus dan anoda atau disebut tegangan ekstraksi. Untuk di dalam tabung akselerator, tambahan energi diperoleh dari tegangan yang dipasang diantara elektrode pertama tabung akselerator sampai elektrode terakhir tabung akselerator (ground). Besar tambahan energi yang diberikan pada berkas elektron di dalam sumber elektron berbanding lurus dengan medan listrik atau tegangan listrik terpasang untuk mengekstraksi dan memercepat berkas elektron.

Pada kondisi simulasi untuk katode dan anode dihubungkan, maka sepanjang lintasan berkas elektron di dalam sumber elektron hanya mendapat tambahan energi yang relatif kecil yaitu dari efek tegangan pemercepat, serta garis bidang equipotensial yang melengkung pada arah pemfokusan yang relatif besar sehingga diperoleh lintasan berkas elektron terfokus (Gambar 3). Namun setelah mencapai jarak sekitar 75 mm dari elektrode pertama tabung akselerator terjadi persilangan dengan sumbu berkas dan selanjutnya berkas elektron menyebar (*defocusing*). Dari hasil simulasi lintasan berkas elektron tersebut diperoleh kondisi berkas elektron yang keluar dari sumber elektron belum optimal untuk diterapkan pada mesin berkas elektron, karena masih terjadi persilangan dengan sumbu berkas elektron yang akhirnya terjadi penyebaran kembali dan jika penyebarannya terlalu besar dimungkinkan dapat menumbuk elektrode tabung akselerator maupun tabung hanyut (*drift tube*). Dari hasil simulasi ini (Gambar 3) menunjukkan bahwa: diameter berkas elektron saat diemisikan sekitar 15 mm (sekitar diameter bentuk katode/spiral) dan diameter berkas elektron saat keluar dari tabung akselerator diperkirakan sekitar 20 mm. Jenis tabung akselerator yang digunakan untuk simulasi ini adalah

general purpose accelerating tube tipe 2 JA 004150 (NEC Flanges) yang mempunyai diameter celah elektrode pemercepat 101 mm. Jadi diameter berkas elektron hasil simulasi mulai dari sumber elektron hingga keluar dari tabung akselerator jauh di bawah diameter celah elektrode pemercepat sehingga tidak terjadi tumbukan antara berkas elektron dengan elektrode pemercepat.

Simulasi dilanjutkan dengan memasang anode dan variasi tegangan ekstraksi atau tegangan katode-anode pada 5 kV, 10 kV dan 15 kV. Tujuan memasang elektrode anode dan tegangan ekstraksi adalah untuk mengekstraksi elektron yang diemisikan oleh katode dan memberikan energi awal sebelum dipercepat di dalam tabung akselerator. Pada Gambar 4 ditunjukkan hasil simulasi untuk tegangan katode-anode 5 kV, Gambar 5 untuk tegangan katode-anode 10 kV dan Gambar 6 untuk tegangan katode-anode 15 kV. Pada simulasi ini (Gambar 4), berkas elektron keluar dari sumber elektron sudah mempunyai energi sekitar 5 keV yang diperoleh akibat ekstraksi (pemercepatan) dari tegangan katode-anode 5 kV. Dengan energi ini, berkas elektron saat keluar dari sumber elektron dan masuk ke tabung akselerator mempunyai rigiditas/kekakuan/ketegaran (*rigidity*) yang lebih besar jika dibandingkan dengan berkas elektron pada kondisi katode-anode dihubungkan. Dengan rigiditas yang lebih besar maka lebih sulit dibelokkan dan terbukti dari hasil simulasi baru terjadi titik fokus (persilangan dengan sumbu berkas) pada jarak sekitar 125 mm, titik fokus ini lebih jauh 50 mm jika dibandingkan dengan kondisi katode-anode dihubungkan.

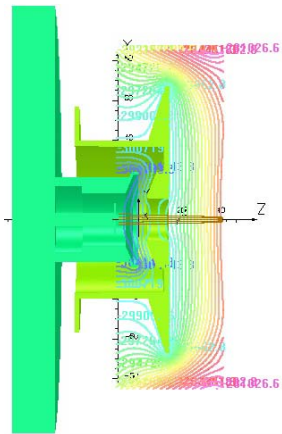
Pada Gambar 4.a dan 4.b ditunjukkan garis bidang equipotensial dan lintasan berkas elektron di dalam sumber elektron dan saat masuk tabung akselerator. Jika dibandingkan dengan simulasi untuk katode, elektrode pemfokus dan anode dihubungkan (Gambar 3.a dan 3.b) terjadi perbedaan terutama garis bidang equipotensial yang terbentuk walaupun keduanya dapat memberikan efek pemfokusan serta jarak titik fokus berkas elektron. Pada Gambar 3.a dan 3.b, garis bidang equipotensial mulai dari sumber elektron sampai sisi masuk tabung akselerator mengikuti geometri elektrode pemfokus yang mengarahkan berkas elektron terfokus. Untuk Gambar 4.a dan 4.b, garis bidang equipotensial hanya di sekitar elektrode pemfokus yang mengikuti geometri elektrode pemfokus sehingga memberikan efek pemfokusan yang kuat. Selanjutnya di sekitar anode-elektrode pemercepat (sisi masuk tabung akselerator) cenderung datar sehingga memberikan efek pemfokusan yang rendah. Untuk bidang equipotensial di dalam tabung akselerator baik pada Gambar 3.c maupun 4.c tidak terjadi perbedaan yang signifikan dan hanya berfungsi untuk memberikan energi/mempercepat berkas elektron. Hasil simulasi pada Gambar 4, karena anode mempunyai ketebalan 6 mm maka bentuk garis bidang

equipotensial melengkung ke arah sumbu Z positif untuk sisi masuk anoda dan kearah Z negatif untuk sisi keluar anode, dengan bentuk ini maka pada celah (lubang) anode di sisi masuk memberikan efek penyebaran dan di sisi keluar memberikan efek pemfokusan. Efek penyebaran dan pemfokusan di sekitar anode sangat dipengaruhi oleh besar medan listrik antara katode-anode dan anode-elektrode pertama tabung akselerator. Untuk tegangan katode-anode 10 kV dan 15 kV hampir sama dengan tegangan katode-anode 5 kV, perbedaannya pada daerah katode-anode mempunyai energi ekstraksi dan pemercepatan yang lebih tinggi sehingga berkas elektron keluar dari sumber elektron mempunyai energi yang cukup tinggi.

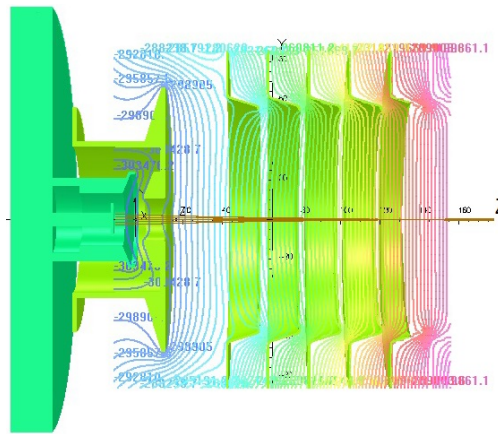
Bentuk garis bidang equipotensial hampir sama, perbedaan terletak di sekitar anoda yaitu pada sisi masuk dan sisi keluar anoda. Pada sisi masuk, garis bidang equipotensial cenderung lebih dalam dan pada sisi keluar cenderung lebih datar. Dari bentuk garis bidang equipotensial ini maka makin tinggi tegangan

katode-anode makin besar efek penyebaran dan makin kecil efek pemfokusannya. Akibat yang terjadi di dalam sumber elektron adalah untuk lintasan berkas elektron mempunyai efek pemfokusan lebih kecil karena pada jarak lintasan berkas elektron tertentu di dalam sumber elektron mempunyai energi lebih tinggi sehingga mempunyai rigiditas yang lebih tinggi dan tidak mudah dibelokkan atau difokuskan. Di samping itu, di daerah masuk anode kemungkinan disebarkan lebih besar dan di daerah keluar kemungkinan difokuskan lebih kecil.

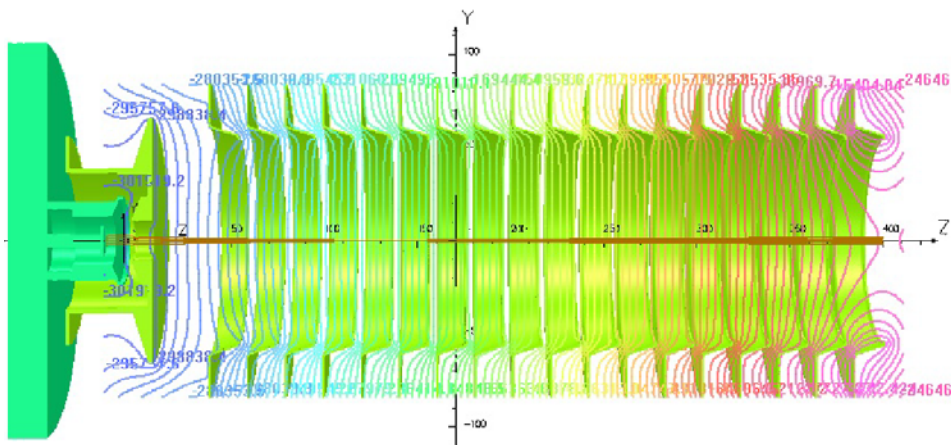
Hal ini dibuktikan dengan hasil simulasi untuk variasi tegangan katode-anode menunjukkan bahwa makin besar tegangan katode-anode maka makin jauh jarak fokus berkas elektron yang dihasilkan yaitu untuk tegangan katode-anode 5 kV sekitar 125 mm, tegangan katode-anode 10 kV sekitar 250 mm dan untuk tegangan katode-anode 15 kV hampir tidak terjadi persilangan berkas elektron dengan sumbu berkas.



a. Daerah sumber elektron

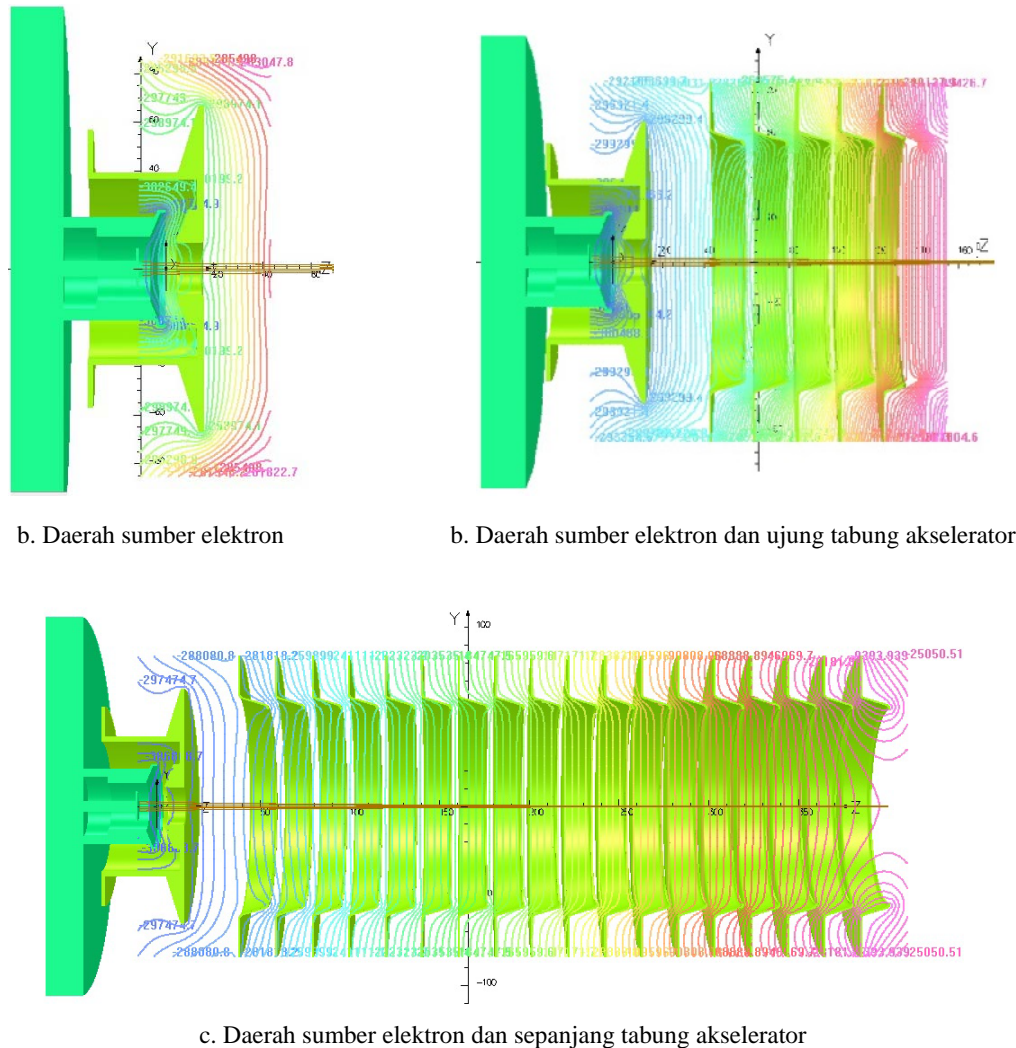


b. Daerah sumber elektron dan ujung tabung akselerator



c. Daerah sumber elektron dan sepanjang tabung akselerator

Gambar 4. Lintasan berkas elektron dan bidang equipotensial untuk tegangan katode-anode 5 kV.

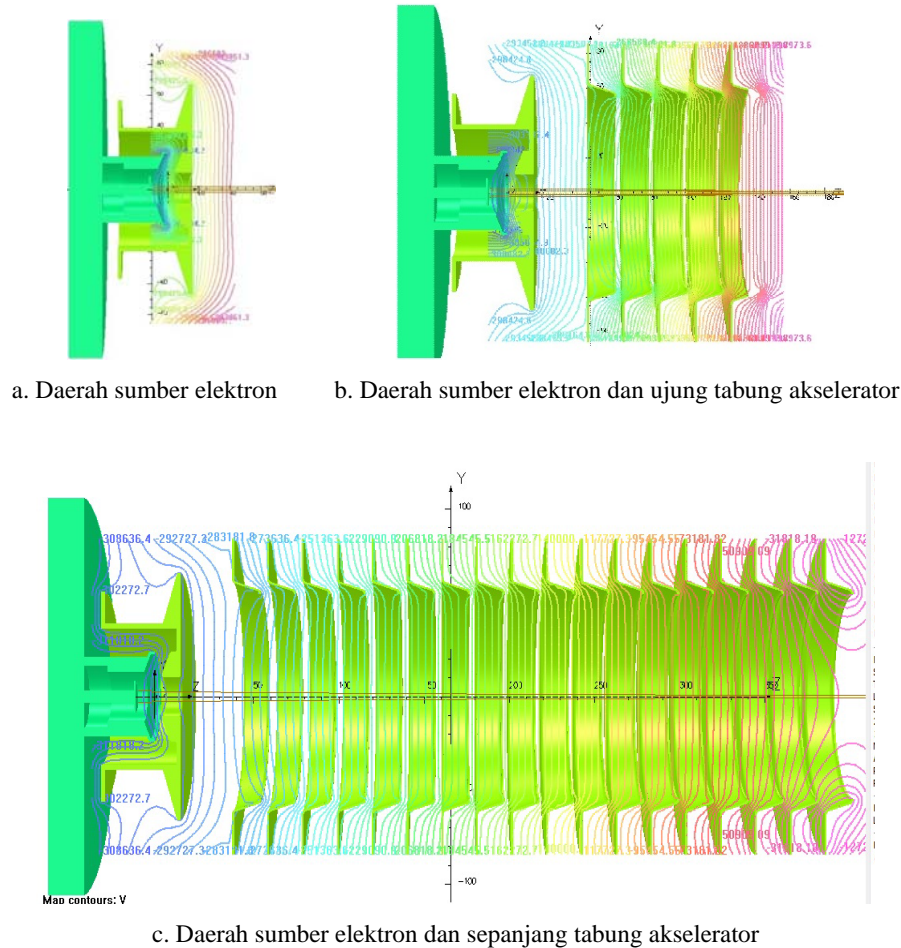


Gambar 5. Lintasan berkas elektron dan bidang equipotensial untuk tegangan katode-anode 10 kV.

Simulasi yang dilakukan oleh B.J. Patil et al. (2012) menggunakan SIMION-7 untuk desain sumber elektron tipe tetrode dengan bagian-bagian utama: katoda, elektroda pemfokus, anoda dan elektrode pengontrol. Simulasi ini dengan tegangan katoda, pemfokus dan anoda tetap dan tegangan elektrode pengontrol divariasikan yang hasilnya menunjukkan bahwa lintasan berkas elektron terfokus dan terjadi titik fokus (persilangan dengan sumbu berkas) di sekitar elektrode pemfokus, selanjutnya menyebar kembali dengan makin besar tegangan elektrode pengontrol makin kecil penyebaran kembali berkas elektron yang keluar dari sumber elektron [6].

Simulasi yang dilakukan oleh J. Lee et al. (2014) menggunakan EGN2w dan CST-Particle Studio untuk desain dan analisis berkas elektron dalam sumber elektron untuk radiotherapy sinar X menunjukkan bahwa lintasan berkas elektron terfokus dan sampai keluar dari sumber elektron belum terjadi titik

fokus (belum terjadi persilangan dengan sumbu berkas) baik untuk simulasi dengan EGN2w maupun CST-Particle Studio [13], sedangkan simulasi yang dilakukan oleh M. M. Abdelrahman (2013) dengan variasi tegangan anoda menunjukkan bahwa makin besar tegangan anoda maka berkas elektron makin terfokus serta diameter dan daya pancar (*emittance*) berkas minimum diperoleh pada tegangan anoda 29,35 kV [14]. Untuk simulasi yang dilakukan oleh J. Lee et al. (2014) dan M. M. Abdelrahman (2013), jenis sumber elektron yang disimulasikan adalah hampir sama yaitu sumber elektron dengan bagian-bagian utama: elektrode emitor, elektrode pemfokus dan anoda sehingga dihasilkan lintasan berkas elektron yang mendekati sama. Jika dicermati geometri sumber elektron yang disimulasikan mempunyai perbedaan sehingga mempengaruhi pembentukan bidang equipotensial dan arah penambahan energi (pemercepatan) sehingga berdampak pada hasil pemfokusan.



Gambar 6. Lintasan berkas elektron dan bidang equipotensial untuk tegangan katode-anode 15 kV.

Untuk sumber elektron yang disimulasikan dengan opera 3D ini mempunyai kemiripan yaitu dengan bagian-bagian utama: elektroda emitor, elektroda pemfokus dan anoda, sehingga lintasan berkas elektron yang dihasilkan di dalam sumber elektron juga hampir sama yaitu terjadi pemfokusan namun tidak terjadi titik fokus (persilangan berkas elektron dengan sumbu berkas). Simulasi dengan opera 3D dilanjutkan sampai keluar dari tabung akselerator sehingga dapat digunakan untuk memprediksi lintasan dari sumber elektron hingga keluar dari tabung akselerator. Pada tegangan katode-anode 5 kV dan 10 kV terjadi titik fokus di dalam tabung akselerator sehingga terjadi persilangan lintasan berkas elektron dengan sumbu berkas sedangkan untuk tegangan katode-anode 15 kV tidak terjadi titik fokus dan persilangan lintasan berkas elektron dengan sumbu berkas. Didasarkan simulasi ini diperoleh pemfokusan berkas elektron terbaik sampai ke luar dari tabung akselerator adalah untuk tegangan katode-anode 15 kV. Karena tidak terjadi persilangan dengan sumbu

berkas dan penyebaran kembali maka di dalam tabung hanyut kecil kemungkinan terjadi penyebaran kembali sehingga masih terfokus.

KESIMPULAN

Dari hasil modifikasi sumber elektron dan simulasi lintasan berkas elektron dapat disimpulkan bahwa perhitungan emisi elektron dapat mencapai arus berkas elektron 55,98 mA pada suhu operasi katode 2200 K dan untuk arus berkas elektron 171,7 mA pada suhu operasi katode 2300 K. Simulasi lintasan berkas elektron mulai dari sumber elektron sampai ke luar tabung akselerator tidak terjadi tumbukan antara berkas elektron dan elektrode tabung akselerator, walaupun untuk tegangan katode-anode 5 kV dan 10 kV lintasan berkas elektron terjadi titik fokus dan persilangan dengan sumbu berkas serta menyebar kembali. Tetapi untuk tegangan katode-anode 15 kV, lintasan berkas elektron terfokus dan tidak terjadi persilangan dengan sumbu berkas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PSTA-BATAN yang telah mengalokasikan anggaran DIPA tahun 2014 dan sebelumnya, Bapak Sukidi, Sumaryadi dan Suhartono atas bantuan yang telah diberikan untuk menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Accelerators for Society." [Online]. Available: <http://www.accelerator-for-society.org/industry/index.php?id=8>. [Accessed: 12-Aug-2015].
- [2] "Food Irradiation." [Online]. Available: <http://www.epa.gov/radiation/source/fooderrad.html>. [Accessed: 12-Aug-2015].
- [3] W. N. Y. Urz, "Nauka I Technika," no. 4, pp. 10–25, 2005.
- [4] C. J. RUAN, X. L. WU, Q. S. LI, and C. S. Li, Development of High Power Electron Beam Measuring and Analyzing System for Microwave Vacuum Electron Devices, *Phys. Procedia*, vol. 32, no. i, pp. 58–62, 2012.
- [5] A. KAUR, C. RIBTON, AND W. BALA CHANDARAN, Electron Beam Characterisation Methods and Devices for Welding Equipment, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 221, pp. 225–232, 2015.
- [6] B. J. PATIL, V. N. BHORASKAR, and S. D. DHOLE, Design, Development and Characterization of Tetrode Type Electron Gun System for Generation of Low Energy Electrons, *Indian J. Pure Appl. Physic*, vol. 50, pp. 482–485, 2012.
- [7] A. A. E.-S. SAFWAT G.ZAKHARY, MAGDI S.RAGHEB, AHMAD ELFALAAKY, Investigation of Beam Performance Parameters in a Pierce-Type Electron Gun, *Sci. Technol.*, vol. 2, no. 6, pp. 191–197, 2012.
- [8] D. ZHU, J. ZHANG, Z. QI, AND W. Li, Simulation of a High-convergence Electron Optics System for an X-band High-impedance Relativistic Klystron, in *PIERS Proceedings*, 2014, pp. 2550–2555.
- [9] S. P. DJOKO and SUPRAPTO, Pengujian Sumber Elektron pada MBE untuk Aplikasi Industri Lateks," in *Prosiding Pertemuan dan*

Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, 2007, vol. 9, pp. 1–9.

- [10] S. SCHILLER, U. HEISIG, and S. PANZER, *Electron Beam Technology*, New York: John Wiley & Sons Inc., 1982.
- [11] M. IQBAL, G. U. ISLAM, A. FARIDI, and H. RASHID, Optimization of Electrostatic Focusing for Line Source Electron Beam Emitter Assembly, *Phys. Procedia*, vol. 32, pp. 891–895, 2012.
- [12] A. K. NEHRA, R. K. GUPTA, S. M. SHARMA, P. C. PANDA, Y. CHOYAL, and R. K. SHARMA, Design and Simulation of Electron Gun for a Multibeam Klystron, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 390, p. 012037, 2012.
- [13] J. LEE, H. KIM, M. GHERGHEREHCHI, S. SHIN, and Y. LEE, Design and Analysis of an Electron Beam in an Electron Gun for X-Ray Radiotherapy, in *Proceedings of IPAC2014*, 2014, pp. 1–4.
- [14] M. M. ABDELRAHMAN, Simulation Study for Electron Gun Using Simion Computer Program," *J. Asian Sci. Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 275–285, 2013.

TANYA JAWAB

Rany Saptoaji

- Dari hasil simulasi SE, persentase mana yang paling baik untuk digunakan pada MBE lateks yang ada di PSTA?

Suprpto

- Jika pemayarnya 1 (satu) dimensi, yang paling baik untuk dudukan anoda di hubungkan dengan elektroda pemfokus. Tetapi jika untuk pemayarnya 2 (dua) dimensi, yang paling baik dengan tegangan katoda-anoda > 5 kV.
- Untuk tegangan katoda-anoda 15 kV, berkas elektron keluar dari tabung pemercepat terfokus sehingga pemayar dengan 2 (dua) dimensi.