

RANCANG BANGUN LENS MAGNETIK SELENOID UNTUK PEMFOKUS BERKAS ELEKTRON SUMBER ELEKTRON TIPE TERMIONIK

Djoko S. Pudjorahardjo, Sudjatmoko, Suprpto
Puslitbang Teknologi Maju, BATAN, Yogyakarta

ABSTRAK

RANCANG BANGUN LENS MAGNETIK SELENOID UNTUK PEMFOKUS BERKAS ELEKTRON SUMBER ELEKTRON TIPE TERMIONIK. Sumber elektron merupakan bagian yang sangat penting pada sebuah akselerator elektron, yaitu sebagai penghasil berkas elektron yang akan diradiasikan pada suatu bahan. Untuk akselerator elektron yang sedang dikonstruksi di P3TM BATAN sumber elektron yang dipergunakan adalah tipe termionik. Lensa magnetik selenoid telah dirancang bangun untuk memfokuskan berkas elektron yang keluar dari sumber elektron tersebut agar semua berkas elektron dapat masuk ke dalam tabung akselerator untuk dipercepat. Spesifikasi teknis lensa magnetik selenoid yang telah dirancang bangun diberikan pada makalah ini. Pengukuran distribusi medan magnet yang dibangkitkan oleh kumparan selenoid menunjukkan bahwa medan magnet terbesar ada pada daerah tengah kumparan selenoid, sedangkan pengujian menggunakan sumber elektron termionik menunjukkan adanya efek pemfokusan oleh lensa magnetik selenoid terhadap berkas elektron dengan kuat pemfokusan maksimum setelah arus kumparan selenoid sebesar 9 A.

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF SOLENOID MAGNETIC LENS FOR FOCUSING ELECTRON BEAM FROM THERMIONIC ELECTRON GUN. Electron gun is an important part of an electron accelerator for producing electron beam to be irradiated on material. The electron gun of electron accelerator constructed at P3TM BATAN, is a thermionic electron gun. A solenoid magnetic lens had been designed and constructed for focusing electron beam extracted from the electron gun in such away that all of the electron beam enter the accelerating tube. Technical specification of the solenoid magnetic lens is given in this paper. Measurement of magnetic field generated by solenoid coil shows that the largest magnetic field is in the middle of the solenoid coil. The test using the thermionic electron gun shows the focusing effect on electron beam by the solenoid magnetic lens. The focus strength is maximum after the coil current reaches 9 A.

PENDAHULUAN

Sumber elektron tipe termionik merupakan satu di antara komponen utama akselerator elektron yang sedang dirancang bangun di Puslitbang Teknologi Maju BATAN Yogyakarta. Sumber elektron mempunyai peranan yang sangat penting sebagai penghasil berkas elektron yang akan diradiasikan pada suatu bahan untuk tujuan tertentu. Sumber elektron tersebut telah dirancang bangun pada tahun 1994/1995 dan arus elektron yang dihasilkan hanya mencapai 8 mA.^[1] Kemudian pada tahun 1997/1998 dilakukan modifikasi sumber elektron terutama pada bagian pembentuk berkas elektron. Dengan modifikasi tersebut telah dapat ditingkatkan besarnya arus elektron hingga 70 mA.^[2] Bagian pembentuk berkas elektron pada sumber elektron tipe termionik tersebut terdiri dari katode dan anode dan telah dibuat mengikuti model elektrode Pierce untuk mendapatkan bentuk berkas elektron yang sejajar. Dalam susunan tersebut katode berbentuk kerucut terpancung dengan sudut kemiringan sebesar $67,5^\circ$,

sedangkan anode dengan bentuk yang sama dengan katode tetapi dengan sudut kemiringan yang lebih besar dari pada katode.

Meskipun susunan elektrode pembentuk berkas elektron telah dibuat mengikuti model elektrode Pierce, tetapi penyebaran atau divergensi berkas elektron tetap tidak dapat dihindari meskipun hanya kecil. Beberapa faktor penyebab terjadinya divergensi berkas elektron pada saat keluar dari sumber elektron adalah gaya Coulomb yaitu gaya tolak menolak antara elektron satu dengan yang lain, tumbukan elektron dengan partikel gas yang masih tersisa dalam sumber elektron, serta adanya efek lensa negatif pada celah sumber elektron yang berfungsi sebagai ekstraktor. Divergensi berkas elektron mengakibatkan sebagian berkas elektron tidak dapat masuk ke dalam tabung akselerator, sehingga akan mengurangi efisiensi berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron tersebut terhadap proses pemercepatan oleh tabung pemercepat dalam sistem mesin berkas elektron.

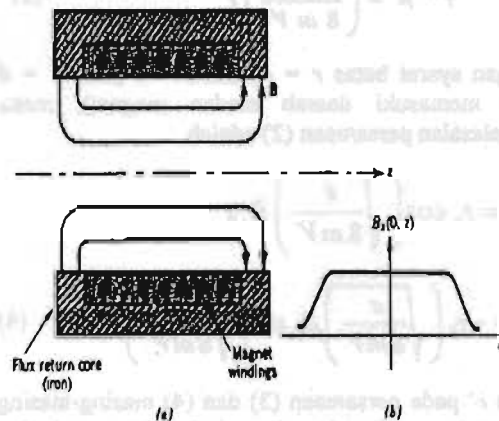
Untuk mengatasi hal tersebut maka sumber elektron perlu dilengkapi dengan sistem pemfokus berkas. Pada tahun anggaran 1998/1999 telah dilakukan rancang bangun sistem pemfokus berkas elektron berupa lensa magnetik selenoid. Pada makalah ini disampaikan hasil rancang bangun lensa magnetik selenoid tersebut serta hasil pengujiannya.

TINJAUAN TEORI

Elektron di dalam suatu berkas elektron selalu mempunyai komponen kecepatan radial, yaitu komponen yang tegak lurus terhadap sumbu berkas elektron (arah utama dari berkas elektron). Komponen radial tersebut dapat timbul pada saat elektron keluar dari sumber elektron. Biasanya sumber elektron beroperasi pada suhu tinggi. Pada sumber elektron tipe termionik elektron dihasilkan melalui proses emisi termionik pada suhu sekitar 3000 K. Akibatnya gerakan elektron di dalam sumber elektron adalah gerakan termal yang bersifat acak dengan kecepatan ke segala arah, sehingga pada saat keluar melalui celah sumber elektron (anode) elektron masih mempunyai komponen kecepatan radial dan elektron bergerak menjauhi sumbu berkas (divergen). Di samping itu sifat tolak menolak antar elektron juga merupakan faktor penyebab terjadinya divergensi berkas.^[1]

Landasan teori dari rancang bangun lensa magnetik selenoid untuk pemfokus berkas elektron adalah interaksi yang terjadi apabila elektron bergerak melalui medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan berarus listrik. Garis-garis medan magnet yang dihasilkan oleh suatu kumparan selenoid panjang merupakan lintasan tertutup melingkupi kumparan selenoid, sehingga untuk bagian tengah selenoid garis-garis medan magnet tersebut sejajar dengan sumbu selenoid. Dengan kata lain medan magnet hanya mempunyai komponen aksial, sedangkan untuk bagian pinggir selenoid garis-garis medan magnet berbentuk lengkung, sehingga selain mempunyai komponen aksial medan magnet juga mempunyai komponen radial seperti terlihat pada Gambar 1.

Apabila elektron bergerak melalui suatu medan magnet maka elektron tersebut mengalami gaya Lorentz yang dituliskan sebagai hasil perkalian silang (*cross product*) antara vektor kecepatan elektron dengan vektor medan magnet, yaitu $F_L = ev \times B$. Pada saat elektron masuk melalui ujung lensa magnetik selenoid maka elektron



Gambar 1. Kumparan selenoid, garis-garis medan magnet dan distribusi medan magnet yang ditimbulkannya.^[2]

tersebut melalui daerah di mana medan magnetnya adalah radial (B_r). Andaikan elektron pada saat itu mempunyai komponen kecepatan aksial dan radial. Hasil perkalian silang antara komponen kecepatan aksial dengan komponen medan magnet radial ($ev_z \times B_r$) adalah gaya Lorentz *azimuthal* yang mengakibatkan elektron bergerak memutar sambil maju sehingga elektron mempunyai komponen kecepatan angular. Selanjutnya perkalian silang antara komponen kecepatan angular (v_θ) dengan komponen medan magnet aksial (B_z) di dalam kumparan selenoid menghasilkan gaya Lorentz radial yang mengakibatkan elektron terdefleksi ke arah sumbu kumparan selenoid. Dengan demikian gerakan elektron secara keseluruhan di dalam kumparan selenoid adalah berbentuk spiral dan makin mendekati sumbu kumparan selenoid.

Andaikan medan magnet B di dalam kumparan selenoid mempunyai distribusi seperti pada Gambar 1, yaitu $B = B_z = \text{konstan}$ di daerah sepanjang L ($0 < z < L$). Panjang fokus lensa magnetik selenoid dapat dijabarkan dengan menggunakan pendekatan sinar paraksial, yaitu berkas elektron di sekitar sumbu lensa di mana vektor kecepatan elektron membentuk sudut yang sangat kecil terhadap sumbu lensa. Persamaan sinar paraksial secara umum untuk elektron yang melalui suatu daerah medan listrik dan medan magnet adalah^[4]

$$r'' + \frac{V'}{2V} r' + \left(\frac{V''}{4V} + \frac{eB_z^2}{8mV} \right) r = 0 \tag{1}$$

dengan V adalah potensial listrik. Andaikan V konstan, maka persamaan sinar paraksial untuk lensa magnetic selenoid adalah menjadi

$$r'' = - \left(\frac{e B_z^2}{8 m V} \right) r \quad (2)$$

Dengan syarat batas $r = r_0$ dan $r' = 0$ pada $z = 0$ (saat memasuki daerah medan magnet), maka penyelesaian persamaan (2) adalah

$$r = r_0 \cos \left(\sqrt{\frac{e}{8 m V}} B_z z \right) \quad (3)$$

$$r' = -r_0 \left(\sqrt{\frac{e}{8 m V}} B_z \right) \sin \left(\sqrt{\frac{e}{8 m V}} B_z z \right) \quad (4)$$

r dan r' pada persamaan (3) dan (4) masing-masing menyatakan *radius* dan *slope* dari elektron terhadap sumbu lensa, dan untuk $z = L$ (pada saat elektron meninggalkan daerah medan magnet) maka *radius* dan *slope* tersebut masing-masing menjadi

$$r_L = r_0 \cos \Phi \quad (5)$$

$$r'_L = -\frac{r_0}{L} \Phi \sin \Phi \quad (6)$$

dengan

$$\Phi = \left(\sqrt{\frac{e}{8 m V}} \right) B_z L \quad (7)$$

Untuk suatu kumparan selenoid dengan jumlah lilitan N dan arus kumparan I , maka medan magnet aksial di dalam kumparan selenoid adalah

$$B_z = \frac{\mu_0 N I}{L} \quad (8)$$

dengan $\mu_0 = 1,356 \times 10^6 \text{ kgmC}^{-1}$ adalah permeabilitas udara, sehingga

$$\Phi = \left(\sqrt{\frac{e}{8 m V}} \right) \mu_0 N I \quad (9)$$

Dari persamaan (6) dapat diperoleh jarak fokus lensa magnetik selenoid yaitu

$$\frac{1}{f} = -\frac{r'_L}{r_0} = \frac{\Phi \sin \Phi}{L} \approx \frac{\Phi^2}{L} \quad (10)$$

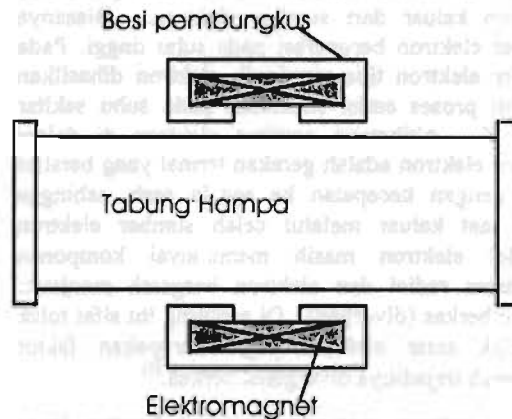
untuk pendekatan sinar paraksial $\sin \Phi \approx \Phi$. Dengan substitusi persamaan (9) ke persamaan (10) diperoleh

$$f = \frac{8 m V L}{e \mu_0^2 N^2 I^2} \quad (11)$$

TATA KERJA

Rancangan Lensa Magnetik Selenoid

Seperti telah disebutkan di muka bahwa lensa magnetik selenoid adalah berupa kumparan arus listrik. Medan magnet yang ditimbulkan oleh kumparan tersebut berkelakuan sebagai lensa terhadap berkas yang melewatinya. Kumparan dirancang sedemikian rupa sehingga arah medan magnet di dalam kumparan sejajar dengan sumbu tabung hampa MBE. Dalam hal ini maka kumparan dirancang melingkari tabung hampa (koaksial). Secara skema susunan lensa magnetik selenoid ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Susunan lensa magnetik selenoid untuk pemfokus berkas elektron.

Rancangan lensa magnetik selenoid terdiri dari tabung hampa dengan *flange* di kedua ujungnya dan kumparan elektromagnet. Untuk tabung hampa digunakan tabung SS ukuran standar DN100 (diameter 100 mm) dengan panjang tabung 250 mm dan tebal 5 mm, sedangkan untuk *flange* digunakan bahan SS tebal 20 mm. Pemilihan bahan SS dengan pertimbangan bahwa SS memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi, laju penglepasan gas (*outgassing*) dan laju pembesaran gas (*permeasi*) yang rendah.

Untuk kumparan elektromagnet dipergunakan kawat tembaga berdiameter 1 mm. Besi pembungkus kumparan dibuat dari plat besi tebal 1 mm, sedangkan isolasi kumparan terdiri dari pertinek tebal 3 mm dan kertas isolasi tebal 0,2 mm. Lebar celah besi pembungkus adalah 25 mm. Jumlah lilitan kumparan N dapat dihitung dari persamaan (11). Selanjutnya apabila jumlah lilitan kumparan telah diketahui, maka dimensi kumparan elektromagnet yang meliputi diameter dalam, diameter luar dan tahanan kumparan dapat ditentukan sebagai berikut:

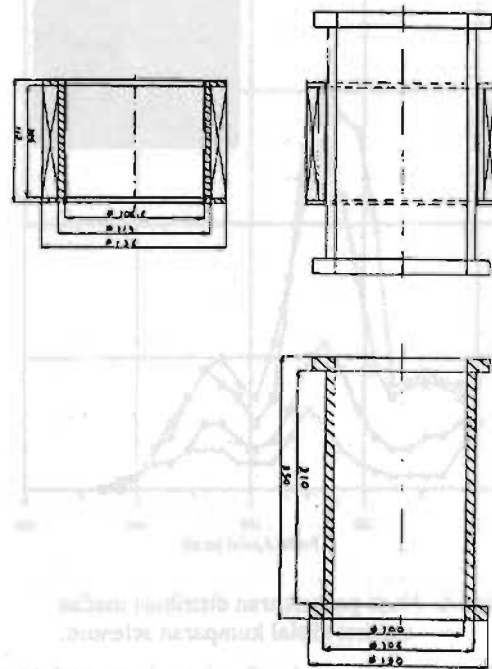
- (a) Diameter dalam kumparan $\phi_d =$ diameter tabung hampa + 2 kali tebal plat besi dan pertinek.

- (b) Diameter luar kumparan ϕ_1 = diameter dalam kumparan + 2 kali tebal kumparan.
- (c) Tahanan kumparan dihitung berdasarkan hukum Ohm yaitu $R_k = \rho L/A$, dengan ρ tahanan jenis kawat tembaga ($1,7 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$), L panjang kawat tembaga = $2\pi rN = \pi\phi_r N$, dengan $\phi_r = (\phi_d + \phi_1)/2$ adalah diameter rata-rata kumparan, A penampang kawat tembaga = $\frac{1}{4} \pi\phi_k^2$, dengan ϕ_k diameter kawat tembaga (1 mm).

Berdasarkan perhitungan tersebut dengan nilai-nilai parameter yang telah ditentukan untuk lensa magnetik selenoid yang dirancang maka diperoleh

- (a) diameter dalam kumparan $\phi_d = 108 \text{ mm}$
- (b) diameter luar kumparan $\phi_1 = 113 \text{ mm}$
- (c) tahanan kumparan $R_k = 1,3 \Omega$.

Susunan kumparan elektromagnet lensa magnetik selenoid yang dirancang adalah seperti ditampilkan pada Gambar 3, sedangkan spesifikasi teknis lensa magnetik selenoid yang dirancang ditampilkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Susunan kumparan elektromagnet lensa magnetik selenoid.

Tabel 1. Spesifikasi teknis lensa magnetik selenoid hasil rancangan

Panjang tabung hampa	250 mm	Jumlah lilitan kumparan	170
Diameter tabung hampa	100 mm	Tahanan kumparan	1,3 Ω
Panjang kumparan	100 mm	Tebal pertinek	3 mm
Diameter dalam kumparan	108 mm	Tebal kertas isolasi	0,2 mm
Diameter luar kumparan	113 mm	Tebal besi pembungkus	1 mm
Diameter kawat kumparan	1 mm	Lebar celah besi pembungkus	25 mm

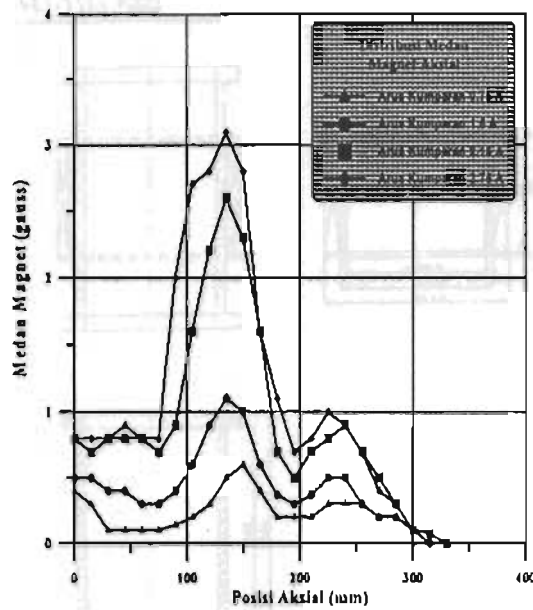
Pengujian Lensa Magnetik Selenoid

Pengujian lensa magnetik selenoid dilakukan untuk mengetahui distribusi medan magnet di dalam lensa magnetik selenoid yaitu dengan mengukur induksi magnet sepanjang sumbu kumparan selenoid menggunakan probe magnet (gaussmeter). Setelah diketahui distribusi medan magnetnya kemudian dilakukan pengamatan karakteristik lensa magnetik selenoid terhadap berkas elektron, yaitu dengan melakukan pengukuran arus elektron dari sumber elektron tipe termionik setelah melewati lensa magnetik selenoid dengan memvariasi arus kumparan selenoida.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Distribusi Medan Magnet Kumparan Selenoid

Secara ideal distribusi medan magnet dalam lensa magnetik selenoid adalah seperti tertampil pada Gambar 1 yaitu untuk daerah di dalam kumparan selenoid medan magnet homogen seperti dinyatakan pada persamaan (8) dan merupakan medan magnet aksial. Tetapi kenyataannya hasil pengukuran distribusi medan magnet kumparan selenoid yang telah dirancang bangun adalah seperti tertampil pada Gambar 4.

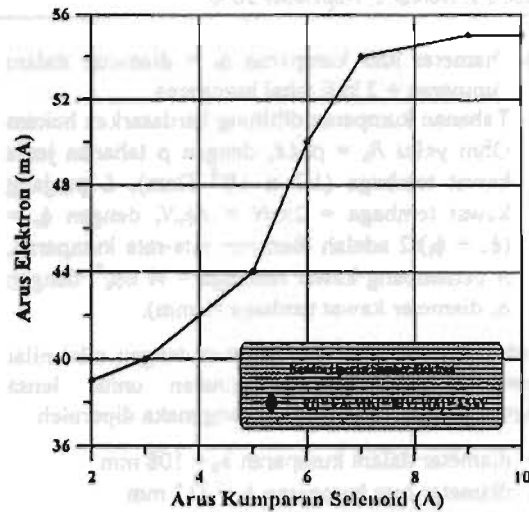


Gambar 4. Hasil pengukuran distribusi medan magnet aksial kumparan selenoid.

Hasil pengukuran pada Gambar 4 menunjukkan bahwa pada posisi aksial antara 100 mm dan 200 mm (posisi di dalam kumparan selenoid sepanjang 100 mm) medan magnet tidak homogen. Sepanjang sumbu kumparan mulai dari pinggir ke arah tengah kumparan medan magnet membesar dan mencapai puncaknya kira-kira di tengah-tengah kumparan. Sesuai dengan teori, besar medan magnet tergantung pada arus kumparan selenoid, sedangkan untuk posisi aksial di luar daerah kumparan hasil pengukuran memperlihatkan bahwa medan magnet cukup kecil bila dibandingkan dengan medan magnet di dalam kumparan khususnya untuk arus kumparan yang makin besar (> 2 A). Medan magnet yang terukur di luar daerah kumparan adalah merupakan medan magnet pinggir yang terdiri dari komponen aksial dan radial. Dengan distribusi medan magnet seperti hasil pengukuran tersebut, maka tentu saja sifat pemfokusan dari lensa magnetik yang dirancang bangun akan sedikit berbeda dari keadaan yang ideal.

Hasil Pengujian Lensa Magnetik Selenoid Dengan Berkas Elektron.

Untuk mengetahui efek pemfokusan dari lensa magnetik selenoid yang telah dirancang bangun maka telah dilakukan pengukuran arus elektron dari sumber elektron termionik setelah melewati lensa magnetik tersebut. Hasil pengukuran adalah seperti ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil pengujian lensa magnetik selenoid dengan berkas elektron dari sumber elektron termionik.

Kondisi operasi sumber elektron termionik saat dilakukan pengukuran adalah: arus filamen 6 A, tegangan katode atau pendorong - 80 V dan tegangan anode atau celah 3,5 kV. Sebelum lensa magnetik selenoid diaktifkan, arus elektron terukur pada target yang ditempatkan setelah lensa adalah 38 mA. Setelah lensa magnetik selenoid diaktifkan dengan arus kumparan mulai dari 2 A hingga 10 A, maka dapat dilihat bahwa arus elektron yang terukur pada target bertambah mulai dari 39 mA hingga 55 mA. Hal ini menunjukkan bahwa adanya efek pemfokusan dari lensa magnetik tersebut terhadap arus berkas elektron yang melewatinya, di mana mula-mula tidak semua arus berkas dapat mengenai target karena berkas menyebar, tetapi setelah adanya lensa magnetik selenoid penyebaran berkas dapat dikurangi, yang ditandai dengan arus berkas elektron yang membesar. Kekuatan lensa magnetik untuk memfokuskan berkas elektron yang terkait dengan panjang fokus lensa magnetik tergantung pada medan magnet yang dihasilkan oleh lensa magnetik dan juga konfigurasi lensa magnetik. Untuk konfigurasi yang tetap, yaitu kumparan selenoid dengan jumlah lilitan tertentu, maka kekuatan lensa magnetik dalam hal ini hanya ditentukan oleh medan magnet lensa yang berarti ditentukan oleh arus kumparan selenoid. Dari hasil pengukuran arus elektron sebagai variasi arus kumparan (Gambar 5), makin besar arus kumparan selenoid makin besar arus elektron, yang berarti makin besar kemampuan lensa magnetik memfokuskan berkas elektron. Dalam hal ini kekuatan maksimum dicapai setelah arus kumparan sebesar 9 A.

KESIMPULAN

Lensa magnetik selenoid telah selesai dirancang bangun sebagai pemfokus berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron tipe termionik. Lensa tersebut merupakan salah satu bagian dari sistem optik mesin berkas elektron 500 keV/10 mA yang sedang dirancang bangun. Dari hasil pengujian lensa tersebut dapat disimpulkan bahwa:

1. Distribusi medan magnet yang dihasilkan oleh lensa magnetik selenoid yang dirancang bangun bentuknya belum sesuai dengan yang diharapkan. Pada posisi aksial sepanjang 100 mm di dalam kumparan selenoid medan magnetnya tidak homogen.
2. Lensa magnetik selenoid telah memperlihatkan efek pemfokusan terhadap berkas elektron yang melewatinya. Hal ini terbukti dengan bertambahnya arus elektron yang terukur pada target setelah lensa magnetik diaktifkan. Makin besar arus kumparan selenoid maka makin besar kuat pemfokusannya dan mencapai maksimum setelah arus kumparan selenoid sebesar 9 A.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada rekan-rekan teknisi di Bidang Akselerator yaitu Sdr. Sumaryadi, Suhartono, Dwi Mulyanto, Ngatinu dan Badi Wiyana atas bantuannya sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan sebaik-baiknya.

DAFTAR ACUAN

1. DJOKO S. P., dkk, "Rancang Bangun Sumber Elektron Untuk Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA", Prosiding Seminar Sehari Mesin Berkas Elektron di PPNY-BATAN, Yogyakarta, 1996.
2. DJOKO S. P., dkk, "Modifikasi Elektroda Pembentuk Berkas Sumber Elektron Tipe Termionik Untuk Peningkatan Arus Elektron", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, PPNY-BATAN, Yogyakarta, 1998.

3. HUMPHRIES, S., Jr., Principle of Charged Particle Acceleration, John Wiley & Sons, New Mexico, 1999.
4. PIERCE, J. R., Theory and Design of Electron Beams, D. Van Nostrand Company Inc., New York, 1954.

TANYA JAWAB

Dewlta

- * Q kecil <0 atau >0
- * Hasil yang diinginkan seperti apa dan kira-kira penyumbang yang dominan apa

Djoko SP

- * Q kecil dan >0
- * Hasil yang diinginkan kira-kira mendekati ideal, tetapi sulit karena meskipun pengukuran sudah dusahakan sebaik mungkin, tetapi jenis atau kualitas bahan sangat berpengaruh pada medan B yang dihasilkan.

Prayitno

- * Bagaimana cara mengatur perubahan arus, apakah dengan perubahan tegangan.

Djoko SP

- * Mengubah arus kumparan dengan cara mengubah tegangannya.

Sunardi

- * Dengan menggunakan apa pengukuran distribusi medan magnet.
- * Bagaimana teknis pengukurannya.
- * Apakah sudah digunakan untuk memfokuskan berkas dan berapa panjang fokusnya.

Djoko SP

- * Distribusi medan magnet diukur dengan probe magnet (gaussmeter).
- * Teknis pengukurannya selama pengukuran B, tabung hampa belum divakum, probe digeser sepanjang sumbu tabung hampa lensa magnetik.
- * Sudah, tetapi panjang fokus belum ditentukan