

PERANCANGAN SISTEM OPTIK MESIN BERKAS ELEKTRON 500 keV/10 mA

Sutadji Sugiarto, Djoko SP. Rahardjo, Sudjatmoko

PPNY-BATAN, JL. Babarsari Po. Box 1008 Yogyakarta 55010

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM OPTIK MESIN BERKAS ELEKTRON 500 keV/10 mA. Dalam Tahun Penelitian 1995/1996 telah dilakukan Perancangan Komponen-komponen Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA, yang meliputi : Sumber Elektron, Tabung Akselerator, Sumber Tegangan Tinggi, Sistem Pemfokus, Sistem Pengarah, Sistem Pemayar, Sistem Hampa, Sistem Fasilitas Radiasi dan Konveyer serta Sistem Elektronik dan Pengendali. Makalah ini membahas Perencanaan Sistem Optik yang meliputi : Sistem Pemfokus, Sistem Pengarah dan Sistem Pemayar. Sistem Pemfokus adalah berupa kumparan terbungkus besi, Sistem Pengarah adalah berupa dua pasang elektromagnet yang saling tegak lurus dan Sistem Pemayar adalah berupa satu pasang elektromagnet arus tukar. Sistem Pemfokus-1, didepan Tabung Akselerator, dirancang mempunyai jarak fokus 1 m untuk tenaga elektron 10 keV. Sistem Pemfokus-2, dibelakang Tabung Akselerator dirancang mempunyai jarak fokus 1 m untuk tenaga elektron 1 MeV. Sistem Pengarah dirancang mempunyai sudut pembelok 30° untuk tenaga elektron 1 MeV. Sistem Pemayar dirancang mempunyai jarak penyimpangan 120 cm dengan sudut pembelokan 20° untuk tenaga elektron 1 MeV. Dengan sistem ini diharapkan berkas elektron 500 keV/10 mA dapat dikendalikan.

ABSTRACT

DESIGN OF OPTIC SISTEM FOR 500 keV/10 mA ELECTRON BEAM MACHINE. In The 1995/1996 Research Year design of Electron Beam Machine components i.e.: Electron Source, High Voltage Supply, Accelerator Tube, Focussing System, Steering System, Scanning System, Vacuum System, Radiation Facility and Conveyer System also Electronics and Control System was carried out. This paper describes the design of Focussing, Steering and Scanning Systems. The Focussing System was an iron sheathed selenoid the Steering System was two sets of electromagnet placed perpendicular each other and the Scanning System was a set of alternating current electromagnet. The first Focussing System was designed to have 1 m focus distance for electron beam of 10 keV energy the second Focussing System was designed to have 1 m focus distance for electron beam of 1 MeV energy, the Steering System was designed to have 30° deflection angle for electron beam of 1 MeV energy and the Scanning System was designed to have 120 cm deflection distance and 20° deflection angle for electron beam of 1 MeV. Using these systems the 500 keV/10 mA Electron Beam Machine could be controled.

PENDAHULUAN

Dalam Mesin Berkas Elektron, berkas elektron yang dihasilkan oleh Sumber Elektron dilewatkan pada Sistem Pemfokus-1, Tabung Akselerator, Sistem Pemfokus-2, Sistem Pengarah, Sistem Pemayar, Jendela dan diiradiasikan pada sasaran di belakang jendela. Sistem Pemfokus dipergunakan untuk memfokuskan (membuat arah menyempit) berkas elektron yang arahnya menyebar. Arah berkas menyebar dapat terjadi karena : tumbukan dengan atom-atom bebas, gaya tolak antar elektron dalam berkas dan medan listrik sistem, misal pada sistem ekstraktor. Sistem Pengarah dipergunakan untuk mengarahkan berkas elektron agar bergerak sepanjang sumbu tabung hampa. Berkas elektron dapat bergerak menyimpang dari sumbu tabung hampa karena pelurusan sistem hampa yang tidak lurus benar. Sistem Pemayar dipergunakan untuk menyimpangkan berkas elektron ke samping kanan dan kiri agar jatuh di seluruh permukaan sasaran di

belakang jendela Mesin Berkas Elektron. Sistem Optic dirancang dengan kriteria :

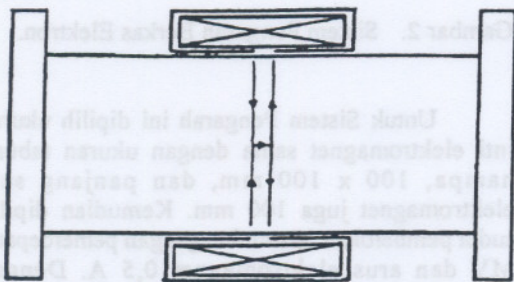
1. Untuk tenaga elektron yang lebih tinggi agar dapat dipergunakan untuk tenaga elektron yang dirancang
2. Menggunakan daya tegangan dan arus yang rendah
3. Dapat dimodifikasi agar dapat ditingkatkan kemampuannya
4. Menggunakan bahan-bahan yang ada.

PERANCANGAN

1. SISTEM PEMFOKUS-1

Berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron diarahkan menuju kanal keluaran dan masuk ke dalam sistem pemfokus-1, tabung akselerator dan sistem pemfokus-2. Sistem pemfokus berfungsi untuk memfokuskan berkas elektron yang dipancarkan oleh sumber elektron secara menyebar sehingga masuk kedalam tabung akselerator secara mengumpul.

Sistem pemfokus berkas elektron adalah berupa kumparan terbungkus besi (iron sheathed selenoid) yang mempunyai sumbu sama dengan tabung hampa. Bungkus besi dipergunakan untuk mengurangi medan magnet tepi dan memampatkan medan magnet ke suatu sela antara ujung bungkus besi. Medan magnet arahnya sejajar dengan sumbu tabung hampa dan mempunyai komponen radial pada tepi-tepi bungkus besi dibagian depan dan belakang, $B_z = B_0$ dan 0 ditempat lain seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Pemfokus Berkas Elektron.

Diandaikan berkas elektron mempunyai komponen kecepatan aksial dan radial. Pada saat berkas memotong komponen medan magnet di bagian depan lensa, interaksi silang antara komponen medan dengan komponen kecepatan menjadikan gerakan memutar pada berkas. Didalam lensa komponen kecepatan angular dan radial berkas memotong medan magnet aksial yang menyebabkan gerakan spiral sepanjang sumbu. Akhirnya medan radial di bagian belakang lensa berinteraksi silang dengan komponen aksial kecepatan.

Jarak fokus f sistem fokus ini adalah :

$$f = \frac{8 m E d}{\mu_0 N^2 I^2}$$

- dimana
- m : massa elektron, kgm
 - E : tenaga elektron, eV
 - d : panjang sela, m
 - e : muatan elektron, C
 - μ_0 : permeabilitas udara, H/m
 - N : jumlah lilitan
 - I : kuat arus, A

Untuk memperkecil daya sistem pemfokus yang berada di terminal tegangan tinggi dipilih jumlah lilitan kumparan yang besar.

Untuk tabung hampa dipergunakan ukuran yang biasa dipergunakan pada akselerator yaitu DN100CF, yang mempunyai diameter 100 mm dan

panjang 127 mm. Panjang kumparan dipilih setengah panjang tabung hampa, agar dapat digeser dengan jarak setengah panjang tabung yaitu 100 mm. Panjang sela dipilih 25 mm.

Untuk Sistem Pemfokus-1, didepan Tabung Akselerator, dipilih jarak fokus 1 m untuk tenaga elektron 10 keV dan kuat arus elektromagnet 0,5 A. Dari nilai-nilai ini dapat nihitung junlah lilitan

$$N = \frac{(8 m E d / e f)^{1/2}}{(\mu_0 I)} = 170$$

Untuk kumparan dipergunakan kawat tembaga diameter 1 mm, plat besi tebal 1 mm, pertinek tebal 3 mm dan kertas isolasi 0,2 mm. Dari nilai-nilai ini dapat dihitung ukuran kumparan :

- a. Diameter dalam kumparan = diameter tabung hampa + 2 x (tebal plat besi dan pertinek) = 108 mm
- b. Diameter luar kumparan = diameter dalam + 2 x tebal kumparan = 108 + 2x(1,2 x 170/94) = 113 mm
- c. Tahanan kumparan = tahanan jenis x panjang /luas tembaga, = $(1,7 \times 10^{-6}) \times (170) \times (\pi) / ((10,8+11,3)/2) / (\pi/400) = 1,3 \text{ ohm}$.

Spesifikasi Teknik

1. Panjang tabung hampa : 250 mm
2. Diameter tabung hampa : 100 mm
3. Panjang kumparan : 100 mm
4. Diameter dalam kumparan : 108 mm
5. Diameter luar kumparan : 113 mm
6. Panjang sela : 25 mm
7. Tebal bungkus besi : 1 mm
8. Tebal pertinek : 3 mm
9. Diameter kawat : 1 mm
10. Tebal kertas isolasi : 0,2 mm
11. Jumlah lilitan : 170
12. Tahanan kumparan : 1,3 ohm
13. Arus maksimum : 1 A
14. Jarak fokus f : $K E / I$, K : 25E-6 A / eV (Jarak fokus 1 m untuk tenaga elektron 10 keV arus 0,5 A)

2. SISTEM PEMFOKUS-2

Sistem Pemfokus-2 diletakkan sesudah tabung akselerator. Cara kerja sistem ini sama dengan cara kerja Sistem Pemfokus-1, namun untuk elektron yang sudah dipercepat, berarti tenaga elektron besar. Untuk itu dipergunakan kumparan dengan jumlah lilitan besar. Dipilih tenaga elektron 1 MeV, dengan nilai parameter yang lain sama, maka dapat dihitung jumlah lilitan

$$N = \frac{(8 m E d / e f)^{1/2}}{(\mu_0 I)} = 1698$$

Dengan dipegunakan bahan-bahan yang sama dapat dihitung ukuran kumparan :

- Diameter dalam kumparan = diameter tabung hampa + 2 x (tebal plat besi dan pertinek) = 108 mm
- Diameter luar kumparan = diameter dalam + 2 x tebal kumparan = 108 + 2x(1,2x1609/94) = 149 mm
- Tahanan kumparan = tahanan jenis x panjang / luas tembaga, = $(1,7 \times 10^{-6})(1609)(\pi) / ((10,8+11,3)/2)(\pi/400) = 15 \text{ ohm}$.

Spesifikasi Teknik

- Panjang tabung hampa : 250 mm
- Diameter tabung hampa : 100 mm
- Panjang kumparan : 100 mm
- Diameter dalam kumparan : 108 mm
- Diameter luar kumparan : 149 mm
- Panjang sela : 25 mm
- Tebal bungkus besi : 1 mm
- Tebal pertinek : 3 mm
- Diameter kawat : 1 mm
- Tebal kertas isolasi : 0,2 mm
- Jumlah lilitan : 1698
- Tahanan kumparan : 15 ohm
- Arus maksimum : 1 A
- Jarak fokus f : $K E/I$, K : 25E-8 A/eV (Jarak fokus 1 m untuk tenaga elektron 1 MeV arus 0,5 A)

3. SISTEM PENGARAH

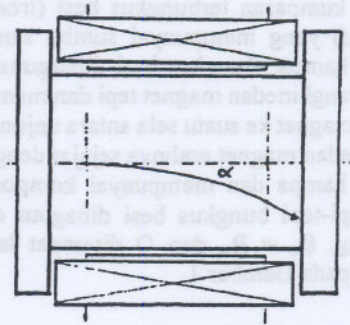
Berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron diarahkan menuju kanal keluaran dan masuk kedalam sistem pemfokus-1, tabung akselerator, sistem pemfokus-2 dan sistem pengarah. Sistem pengarah berfungsi untuk mengarahkan berkas elektron agar bergerak sepanjang sumbu tabung hampa.

Sistem pengarah berkas elektron adalah berupa dua pasang elektromagnet yang dipasang saling tegak lurus dan memotong sumbu tabung hampa. Arah berkas elektron dapat dikendali dengan medan elektromagnet karena pengaruh gaya Lorentz. Terlihat pada Gambar 2, besar sudut pembelokan α adalah :

$$\alpha = \arcsin \frac{\mu_0 N I L}{g (2 m U / e)^{1/2}}$$

dimana :

- m : permeabilitas udara, H/m
- N : jumlah lilitan
- I : kuat arus, A
- L : panjang elektromagnet, m
- g : panjang sela elektromagnet, m
- m : massa elektron, kgm
- U : tegangan pemercepat, V
- e : muatan elektron, C



Gambar 2. Sistem Pengarah Berkas Elektron.

Untuk Sistem Pengarah ini dipilih ukuran inti elektromagnet sama dengan ukuran tabung hampa, 100 x 100 mm, dan panjang sela elektromagnet juga 100 mm. Kemudian dipilih sudut pembelokan 30 untuk tegangan pemercepat 1 MV dan arus elektromagnet 0,5 A. Dengan nilai-nilai ini dapat dihitung jumlah lilitan pada kumparan :

$$N = \sin \alpha g (2 m U / e)^{1/2} / \mu_0 I L = 1342$$

Dengan dipergunakan bahan-bahan yang sama dapat dihitung ukuran kumparan :

- Diameter dalam kumparan = diameter tabung hampa + 2 x (tebal plat besi dan pertinek) = 108 mm
- Diameter luar kumparan = diameter dalam + 2 x tebal kumparan = 108 + 2 x (1,2 x 1342/94) = 142 mm
- Tahanan kumparan = tahanan jenis x panjang / luas tembaga, = $(1,7 \times 10^{-6})(1342)(\pi) / ((10,8+14,2)/2)(\pi/400) = 11 \text{ ohm}$.

Spesifikasi Teknik

- Panjang tabung hampa : 320 mm
- Diameter tabung hampa : 100 mm
- Penampang elektromagnet : 100 x 100 mm
- Kuat medan magnet B : $K I$, K : 1,686E-2 $W/m^2 \cdot A$ (B : 0,017 W/m^2 untuk arus 1 A)
- Tebal pertinek : 3 mm
- Panjang kumparan : 100 mm
- Diameter dalam : 108 mm
- Diameter luar : 142 mm
- Diameter kawat : 1 mm
- Tebal kertas isolasi : 0,2 mm
- Jumlah lilitan : 1342
- Tahanan kumparan : 11 ohm
- Arus maksimum : 1 A
- Sudut pembelokkan α : $\arcsin K I / U^{1/2}$, K : $1E3 V^{1/2} / A$

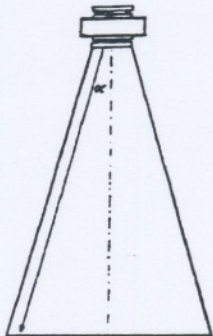
($\alpha 30^\circ$ untuk tegangan pemercepat 1 MV arus 0,5 A)

4. SISTEM PEMAYAR

Berkas elektron yang dihasilkan oleh sumber elektron diarahkan menuju kanal keluaran dan masuk kedalam sistem pemfokus-1, tabung akselerator, sistem pemfokus-2, sistem pengarah dan sistem pemayar. Sistem pemayar berfungsi untuk menyimpangkan berkas elektron agar bergerak ke arah samping kiri dan kanan terhadap sumbu tabung hampa sehingga jatuh ke seluruh permukaan cuplikan di bawah jendela.

Sistem pemayar berkas elektron adalah berupa satu pasang elektromagnet arus tukar yang dipasang memotong sumbu tabung hampa. Arah berkas elektron dapat dikendalikan dengan medan elektromagnet karena pengaruh gaya Lorentz. Sistem Pemayar ini terlihat pada Gambar 3. Besar jarak penyimpangan berkas elektron dari sumbu tabung hampa D adalah:

$$D = R(1 - \cos \alpha) + L_2 \operatorname{tg} \alpha$$



Gambar 3. Sistem Pemayar Berkas Elektron.

$$R = \frac{g(2mU/e)^{1/2}}{\mu_0 NI}$$

$$\alpha = \operatorname{arc} \sin \frac{\mu_0 N I L_1}{g(2mU/e)^{1/2}}$$

dimana g : jarak antara kutub elektromagnet
 m : massa elektron, kgm
 U : tegangan pemercepat, volt
 e : muatan elektron, C
 μ_0 : permeabilitas udara, H/m
 N : jumlah lilitan
 I : kuat arus, A
 L_1 : panjang elektromagnet, m
 L_2 : jarak dari elektromagnet ke jendela, m

Untuk Sistem Pemayar ini dipilih ukuran inti elektromagnet sama dengan ukuran tabung hampa, 100x100 mm, dan panjang sela elektromagnet juga 100 mm. Kemudian dipilih sudut pembelokan 20° untuk tegangan pemercepat 1 MV dan arus elektromagnet 0,5 A. Dengan nilai-nilai ini dapat dihitung jumlah lilitan pada kumparan :

$$N = \sin \bar{\alpha} g (2mU/e)^{1/2} / \mu_0 I L = 918$$

Dengan dipergunakan bahan-bahan yang sama dapat dihitung ukuran kumparan :

- Diameter dalam kumparan = diameter tabung hampa + 2 x (tebal plat besi dan pertinek) = 108 mm
- Diameter luar kumparan = diameter dalam + 2 x tebal kumparan = 108 + 2 x (1,2 x 918/94) = 130 mm
- Tahanan kumparan = tahanan jenis x panjang / luas tembaga = $(1,7 \times 10^{-6})(917)(\pi) / ((10,8+13,0)/2)/(\pi/400) = 7,5$ ohm.

Untuk jarak penyimpangan ke samping $120/2 = 60$ cm, dapat dihitung jarak dari Sistem Pemayar ke Jendela :

$$L_2 = (D - R(1 - \cos \alpha)) / \operatorname{tg} \bar{\alpha} = 1600 \text{ mm}$$

Spesifikasi Teknik

- Panjang tabung hampa : 170 mm
- Diameter tabung hampa : 100 mm
- Penampang elektromagnet : 100 x 100 mm
- Kuat medan magnet B : K I, K : 1,523E-2 W/m².A
(B : 0,012 W/m² untuk arus 1 A)
- Tebal pertinek : 3 mm
- Panjang kumparan : 100 mm
- Diameter dalam : 108 mm
- Diameter luar : 130 mm
- Diameter kawat : 1 mm
- Tebal kertas isolasi : 0,2 mm
- Jumlah lilitan : 918
- Tahanan kumparan : 7,5 ohm
- Arus maksimum : 1 A
- Sudut pembelokkan α : $\operatorname{arc} \sin K IU^{1/2}$,
K : 6,84E2 V^{1/2} /A
($\alpha 120^\circ$ untuk tegangan pemercepat 1 MV arus 0,5 A)
- Jarak pemayar - jendela : 1600 mm
- Panjang jendela : 1300 mm
- Lebar jendela : 100 mm
- Frekuensi arus tukar : 200 Hz

PEMBAHASAN

Dari perhitungan dalam perencanaan diperlukan 3 komponen pokok untuk sistem optik

1. 4 buah tabung hampa DN100CF
2. Kawat tembaga panjang 3,2 Km untuk 8 buah kumparan
3. 5 buah sumber daya tegangan rendah 15 V/1 A, satu diantaranya arus tukar frekuensi 200 Hz.

Ketiga komponen pokok ini relatif murah harganya. Selain itu alat secara realistis dapat dibuat. Jadi untuk Mesin Berkas Elektron, bagian ini adalah bagian yang relatif murah dan mudah dikonstruksi dibandingkan dengan bagian lain seperti Sumber Tegangan Tinggi atau Sistem Hampa.

KESIMPULAN

Telah dilakukan perencanaan Sistem Optik untuk Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA yang meliputi : Sistem Pemfokus-1, Sistem Pemfokus-2, Sistem Pengarah dan Sistem Pemayar. Dari hasil perhitungan dalam perencanaan diperlukan 3 komponen pokok untuk Sistem Optik ini, yaitu :

1. 4 buah tabung hampa DN100CF

2. Kawat tembaga diameter 1 mm panjang 3,2 Km untuk kumparan
 3. 5 buah sumber daya tegangan rendah 15 V/1 A, satu diantaranya arus tukar frekuensi 200 Hz.
- Secara realistis bagian ini relatif murah dan dapat dibuat sendiri.

DAFTAR PUSTAKA :

1. LIVINGSTON M.S., BLEWET J.P., "Particle Accelerator" McGraw Hill, New York, 1967
2. KLEMPERER O. "Electron Optics", Cambridge University Press, London, 1971
3. SUDJATMOKO DKK, "Akselerator Elektron GJ-2, Komponen Utama dan Prinsip Kerjanya", Pertemuan Tim Rekayasa Mesin Berkas Elektron, PAIR, Jakarta, 1993
4. SUDJATMOKO, "Penelitian dan Pengembangan Rancang Bangun, Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA", UsPen, PPNY, Yogyakarta, 1995



Gambar 3. Sistem Pemayar Berkas Elektron