

OPTIMASI ARUS BERKAS ELEKTRON DENGAN PEMFOKUSAN DAN PENGARAHAN-X PADA MBE 350 keV/10 mA

Tono Wibowo, Sigit Hariyanto, Saminto

Puslitbang Teknologi Maju - Batan

ABSTRAK

OPTIMASI ARUS BERKAS ELEKTRON DENGAN PEMFOKUSAN DAN PENGARAHAN-X PADA MBE 350 keV/10 mA. Telah dilakukan optimasi arus berkas elektron dengan pemfokusan dan pengarah-X saat MBE dioperasikan. Arus berkas elektron diamati sebagai fungsi arus pemfokusan atau pengarah-X. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa arus berkas elektron bertambah jika arus pemfokusan tidak lebih dari 0,8 A, skala arus pengarah-X tidak lebih dari 50. Arus berkas elektron diperoleh maksimum pada arus pemfokusan sekitar 0,3 A, arus pengarah-X pada skala sekitar 20. Pada berkas elektron maksimum, perhitungan jarak pemfokusan cocok dengan hasil eksperimen bila telah dikoreksi secara relativistik terhadap massa elektron. Hasil eksperimen lainnya dibandingkan dengan data perhitungan.

Kata kunci : Mesin Berkas Elektron, pemfokusan, pengarah.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF ELECTRON BEAM CURRENT THROUGH FOCUSING AND X-STEERING AT EBM 350 keV/10 mA. Optimization of electron beam current have been done through focusing and X-steering during the operation of EBM. The electron beam current was observed as a function of current focusing and X-steering. The result of the experiment showed that electron beam current increased if the current of focusing not exceed than 0.8 A, and the current scale of X-steering not exceed than 50. The maximum electron beam was found at focusing current of about 0.3 A, X-steering current at scale about 20. At maximum electron beam, the calculation of focusing length match with the experiment result if it was corrected by introducing the relativistic effect of the electron mass. The result of the other experiment was compared with calculating data.

Keyword : Electron Beam Machine, focusing, steering.

PENDAHULUAN

Mesin Berkas Elektron (MBE) merupakan alat pemercepat elektron yang dapat menghasilkan elektron dengan energi kinetik dalam orde ratusan kilo hingga mega elektron volt. Besar energi elektron ini biasanya dipilih sesuai dengan tingkat kebutuhan pemakai. Di P3TM Batan Yogyakarta pada tahun 2003 telah berhasil dibuat mesin berkas elektron yang disebut sebagai MBE 350 keV/10 mA. Angka 350 menunjukkan energi kinetik elektron sedangkan angka 10 menunjukkan besarnya arus berkas elektron yang dihasilkan. Pada kisaran energi 350 keV ini, berkas elektron dapat digunakan untuk misalnya : *curing (coating/laminating/printing)*, sterilisasi, *foamed PE plastic, rubber tire*^[1].

MBE yang dibuat di P3TM-Batan Yogyakarta, komponen utamanya terdiri dari: sistem vakum, sumber elektron, tabung pemercepat, lensa

magnet pemfokusan, magnet pengarah, magnet pemayaran dan corong pemayaran berkas elektron. Berkas elektron yang keluar dari sumber elektron dipercepat dengan sumber tegangan tinggi Cockroft-Walton. Berkas elektron kemudian dilewatkan pada lensa magnet pemfokusan (solenoid). Di dalam lensa magnet ini berkas elektron akan mengalami gaya Lorentz yang dapat membuat berkas elektron terfokus pada suatu jarak tertentu^[2]. Terfokusnya berkas elektron pada suatu tempat tentunya akan ditandai dengan meningkatnya arus berkas di tempat itu. Berkas elektron setelah melewati lensa magnet pemfokusan masuk ke dalam medan magnet pengarah. Di dalam magnet pengarah-X, berkas elektron yang melewati akan berinteraksi dengan medan dan menghasilkan gaya Lorentz yang akan menggeser berkas elektron ke arah x, arah horisontal yang tegak lurus terhadap arah pemayaran berkas elektron. Jika terjadi pergeseran berkas, maka tentu juga akan terjadi perubahan arus

berkas elektron. Pada tempat monitor berkas akan mendeteksi perubahan berkas elektron yang terjadi. Penelitian ini bertujuan untuk mencari kondisi optimal berkas elektron yang dapat dicapai ketika pemfokusan dan pengarahannya (ke arah-X) dilakukan, dan dari data eksperimen yang diperoleh akan dapat diketahui karakter dari kedua bagian komponen MBE tersebut.

DASAR TEORI

Suatu partikel bermuatan yang melewati suatu medan magnet geraknya akan dipengaruhi oleh gaya Lorentz. Ke arah mana elektron akan bergerak bergantung pada arah kecepatan partikel dan arah medan magnet. Untuk elektron di dalam medan magnet, gaya Lorentz dituliskan dengan suatu persamaan gerak berdasarkan hukum Newton sebagai^[3,4]

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = ev \times B \quad (1)$$

dengan F gaya Lorentz, m massa elektron, e muatan elektron, v kecepatan elektron dan B medan magnet.

Berkas elektron yang melewati medan magnet solenoid dengan arah sesuai arah berkas tidak akan merubah arah berkas. Tetapi bila terdapat elektron yang memasuki medan dengan arah tidak sejajar, maka komponen kecepatan elektron yang tegak lurus medan mengakibatkan berkas elektron bergerak maju sambil berpresesi ke arah medan. Dengan gerakan yang seperti itu, setelah menjalani sepanjang medan tertentu maka berkas elektron akan terkumpul pada suatu titik, berkas menjadi terfokus. Dengan kata lain, medan magnet dari suatu kumparan solenoid yang dipasang sesumbu dengan arah perjalanan berkas dapat digunakan sebagai lensa pemfokusan berkas elektron.

Untuk berkas elektron yang melewati kumparan solenoid (terbungkus besi) dengan lebar celah magnet d , energi kinetik elektron E , jumlah lilitan solenoid N dan arus kumparan solenoid I , besarnya jarak fokus berkas elektron dinyatakan sebagai^[2,5]

$$f = \frac{8mEd}{\mu_0^2 N^2 I^2 e} \quad (2)$$

atau

$$f = k \frac{mE}{I^2} \quad (3)$$

dengan

$$k = \frac{8d}{\mu_0^2 N^2 e} \quad (4)$$

dan μ_0 permeabilitas vakum.

Untuk berkas elektron yang melewati suatu magnet pengarahannya (kumparan Helmholtz) dengan arah medan magnet tegak lurus arah berkas, berkas elektron akan menderita gaya Lorentz yang akan mengakibatkan berkas dibelokkan dengan sudut sebesar^[2,3]

$$\alpha = \arcsin \frac{\mu_0 N I L}{g(2mU/e)^{1/2}} \quad (5)$$

N jumlah kumparan pengarahannya, I arus kumparan, L panjang magnet, dan U tegangan pemercepat elektron.

Menurut teori relativitas, bila suatu partikel bergerak dengan kecepatan yang nilainya tidak dapat diabaikan terhadap kecepatan cahaya, maka koreksi relativistik harus dilakukan. Koreksi relativistik terhadap massa yang bergerak adalah^[3]

$$m = \gamma m_0 \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{E + m_0 c^2}{m_0 c^2} \quad (7)$$

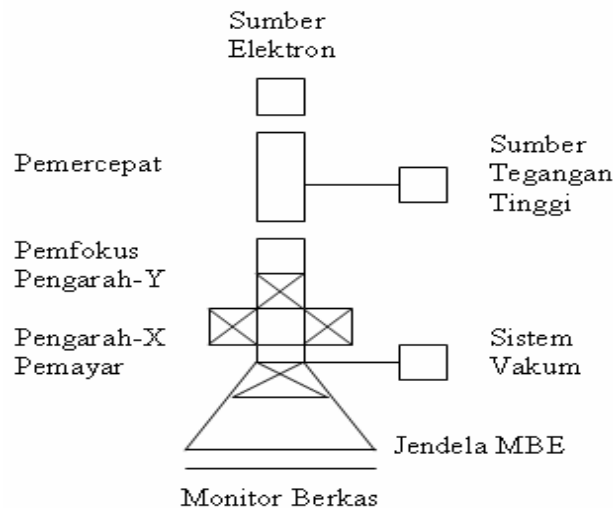
dengan m_0 massa diam elektron, E energi kinetik elektron, c kecepatan elektron, γ faktor relativistik. Faktor relativistik sering dituliskan sebagai $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, dengan v kecepatan elektron.

TATAKERJA

Optimasi arus berkas elektron dengan pemfokusan dan pengarahannya dilakukan pada peralatan MBE yang telah dibuat, ditambah multimeter digital sebagai alat bantu untuk kalibrasi skala-arus. Pengoperasian MBE dilakukan sesuai petunjuk operasi yang ada dan dilakukan oleh operator MBE. Skema peralatan yang digunakan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada kondisi MBE beroperasi, elektron yang keluar dari sumber elektron dipercepat dalam tabung pemercepat. Percepatan ini menghasilkan berkas elektron dengan energi kinetik dan arus berkas tertentu. Besarnya energi kinetik elektron diatur dengan merubah besarnya sumber tegangan tinggi, sedangkan besarnya arus berkas diatur dengan merubah arus filamen pada sumber elektron. Setelah melewati pemercepat berkas elektron kemudian masuk ke dalam medan magnet solenoid, pemfokusan.

Untuk memperoleh data eksperimen, dilakukan variasi arus yang mengalir (dari 0 sampai 0,8 A) pada kumparan solenoid, dan perubahan arus berkas yang terjadi diamati. Pada data pengamatan yang

menunjukkan arus berkas maksimal dibandingkan perhitungan teori berdasarkan persamaan (2) secara klasik, dan juga dilakukan koreksi relativistik dengan persamaan (6) dan (7).



Gambar 1. Skema peralatan MBE.

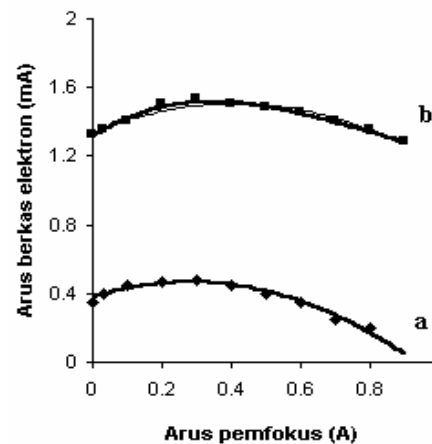
Setelah berkas elektron keluar dari sistem pemfokusan, berkas elektron kemudian melewati sistem pengarah-Y dan pengarah-X. Sistem pengarah-X berfungsi untuk menggeser berkas elektron ke arah x, arah horisontal yang tegak lurus arah pemayaran berkas. Sedangkan pengarah-Y berfungsi untuk menggeser berkas elektron ke arah y, arah yang sesuai dengan arah pemayaran berkas elektron. Pada sistem pengarah-X, skala yang digunakan untuk mengatur arus kumparan magnet pembelok divariasikan dan dilakukan pengamatan terhadap perubahan arus berkas. Setelah dilakukan kalibrasi skala pengarah-X dengan arus yang mengalir pada kumparan pengarah-X, pergeseran berkas yang diperoleh dari hasil perhitungan dibandingkan dengan data eksperimen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Optimasi Berkas Dengan Pemfokusan

Medan magnet solenoid yang terpasang sebagai sistem pemfokusan berkas elektron MBE 350 keV/10 mA nyata berpengaruh terhadap arus berkas elektron. Pengaruh perubahan medan magnet pemfokusan terhadap perubahan arus berkas elektron ketika MBE beroperasi dengan energi elektron (290 ± 7) keV, arus filamen sumber

elektron 11 A, serta ketika energi elektron (307 ± 7) keV, arus filamen dinaikkan menjadi 11,5 A seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perubahan arus berkas elektron akibat perubahan arus pemfokusan. (a) Berkas elektron dengan energi (290 ± 7) keV, pada arus filamen 11 A, (b) Berkas elektron dengan energi (307 ± 7) keV, pada arus filamen 11,5 A.

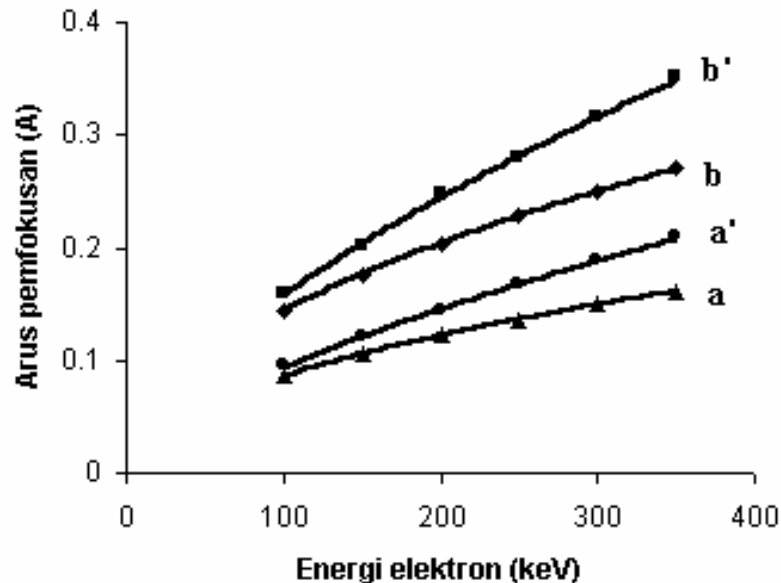
Pada Gambar 2. kelihatan bahwa kedua data menunjukkan pola yang mirip. Arus berkas elektron

bertambah ketika arus solenoid pemfokusan dinaikkan. Setelah mencapai arus pemfokusan sebesar 0,3 A arus berkas elektron menunjukkan maksimum. Penambahan arus solenoid selanjutnya mengakibatkan arus berkas elektron menurun. Penurunan arus berkas elektron ini dapat mencapai nilai di bawah arus berkas elektron awal. Perubahan arus berkas elektron tersebut akibat adanya pergeseran titik fokus ketika arus pemfokusan divariasi.

Untuk arus filamen 11 A (Gambar 2a), pada arus solenoid pemfokusan 0,3 A diperoleh arus berkas elektron maksimum sebesar 0,48 mA atau terjadi penambahan sebesar 37% dari nilai arus berkas awal. Sedangkan untuk arus filamen 11,5 A (Gambar 2b), pada arus solenoid pemfokusan 0,3 A, diperoleh arus berkas elektron maksimal sebesar 1,53 mA atau terjadi penambahan sebesar 16% dari nilai arus berkas awal. Dari hasil pengamatan ini terlihat bahwa kedua data menunjukkan pemfokusan

pada arus yang sama, yaitu ketika arus pemfokus sebesar 0,3 A. Tidak ada perbedaan antara data pertama dan data kedua jika dilihat dari posisi pemfokusan berkas. Tidak adanya perbedaan ini dapat difahami karena perbedaan energi dari kedua data tersebut sebesar 17 keV. Beda energi ini hanya akan menggeser arus pemfokus sebesar 0,007 A yang merupakan arus tak terbaca oleh panel meter pemfokus MBE, arus diluar jangkauan kepekaan panel meter pemfokus MBE.

Berdasar perhitungan dengan mengambil nilai jarak fokus $f = 2,8$ m dan $f = 1$ m menggunakan persamaan (2) dan (6), perubahan arus pemfokusan terhadap perubahan energi elektron yang ditunjukkan pada Gambar 3, akan digunakan sebagai pembandingan terhadap hasil eksperimen. Garis a dan b adalah hasil perhitungan tak relativistik, sedangkan garis a' dan b' adalah hasil perhitungan setelah dilakukan koreksi relativistik terhadap massa elektron.



Gambar 3. Hasil perhitungan arus pemfokusan terhadap perubahan energi elektron. (a) Pada jarak fokus $f = 2,8$ m dengan perhitungan klasik, a' perhitungan relativistik; (b) Pada jarak fokus $f = 1$ m dengan perhitungan klasik, b' perhitungan relativistik.

Dari hasil eksperimen diperoleh bahwa pada energi elektron sekitar 300 keV telah terjadi pemfokusan berkas elektron dengan arus pemfokus 0,3 A. Jika hasil ini dibandingkan dengan nilai yang tercantum pada Gambar 3a, maka untuk energi elektron 300 keV pemfokusan yang sesuai adalah

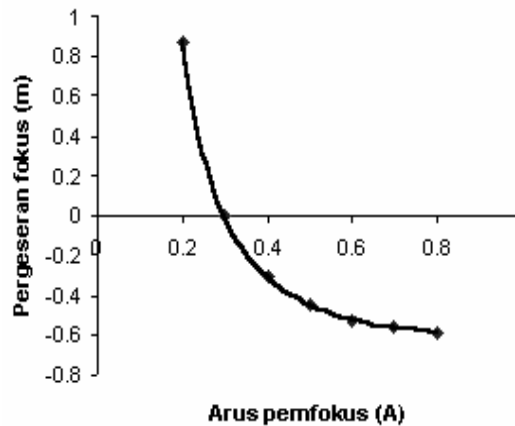
pada arus pemfokus 0,15 A. Besar arus pemfokusan ini berbeda 50% dari arus pemfokusan yang diperoleh dalam eksperimen. Apabila dibandingkan dengan nilai yang tercantum pada Gambar 3a', maka untuk energi elektron yang sama pemfokusan yang sesuai adalah pada arus pemfokusan 0,19 A

atau terjadi perberbedaan sebesar 37% dari arus pemfokusan yang diperoleh dalam eksperimen. Tampak disini tidak ada kesesuaian antara hasil eksperimen dengan perhitungan teori, baik sebelum maupun sesudah dilakukan koreksi relativistik terhadap massa elektron. Tidak sesuai halnya hasil eksperimen dengan perhitungan teori ini disebabkan oleh ketidakcocokan dalam pengambilan nilai jarak fokus. Semula diasumsikan bahwa pemfokusan berkas dapat dilakukan di tempat penyetop berkas atau terfokus pada jendela corong pemayar yang terdapat foil titanium (tebal 50 μm , sebagai jendela MBE). Jika terjadi yang terakhir dikawatirkan foil tidak mampu menerima panas dari berkas elektron yang terfokus. Karena jarak magnet pemfokusan dengan penyetop berkas sebesar 2,8 m, sedangkan jarak magnet pemfokusan dengan jendela pemayar 2,7 m, maka dalam perhitungan dipilih salah satu dari angka tersebut. Kenyataan eksperimen menunjukkan tidak ada kemungkinan berkas elektron bisa terfokus pada jarak lebih besar 1 m dari tempat solenoid pemfokus.

Hasil perhitungan dengan mengambil jarak fokus lain yakni pada $f = 1\text{m}$ (jarak fokus ini diambil sesuai dengan jarak antara magnet pemfokusan dengan magnet pemayaran MBE) ditunjukkan pada Gambar 3 b dan b'. Pada Gambar 3 b, untuk energi elektron 300 keV arus pemfokusan menunjukkan sebesar 0,25 A. Besar arus ini berbeda 20 % dari pada arus pemfokusan yang diperoleh dalam eksperimen. Perbedaan ini terjadi karena dalam perhitungan tidak dilakukan koreksi relativistik terhadap massa elektron. Menurut persamaan (7) elektron yang bergerak dengan energi kinetik 300 keV mempunyai kecepatan 0,6 c (kecepatan cahaya), tidak dapat diabaikan terhadap kecepatan cahaya sehingga koreksi relativistik perlu dilakukan. Hasil perhitungan yang dilakukan dengan memasukkan koreksi relativistik terhadap massa elektron ditunjukkan pada Gambar 3 b'. Terlihat bahwa pada energi elektron 300 keV, pemfokusan berkas elektron terjadi pada arus pemfokusan 0,31 A. Nilai ini sesuai dengan arus pemfokusan yang diperoleh dalam eksperimen, dengan perbedaan sebesar 3%. Perbedaan sebesar 3% ini secara eksperimen dapat dianggap baik.

Dari hasil uraian di atas menunjukkan bahwa koreksi relativistik terhadap gerak elektron sudah harus diperhitungkan dalam MBE 350 keV/10 mA. Arus berkas elektron optimal hanya dapat diperoleh jika pemfokusan dilakukan di ujung atas bagian magnet pemayar, atau berjarak 1 m dari tengah-tengah solenoid pemfokus. Jika jarak fokus kurang atau lebih dari 1 m berkas elektron tidak

optimal. Pada Gambar 4. ditunjukkan pergeseran pemfokusan yang mungkin terjadi seandainya arus pemfokusan mengakibatkan titik fokus tidak pada ujung magnet pemayaran.

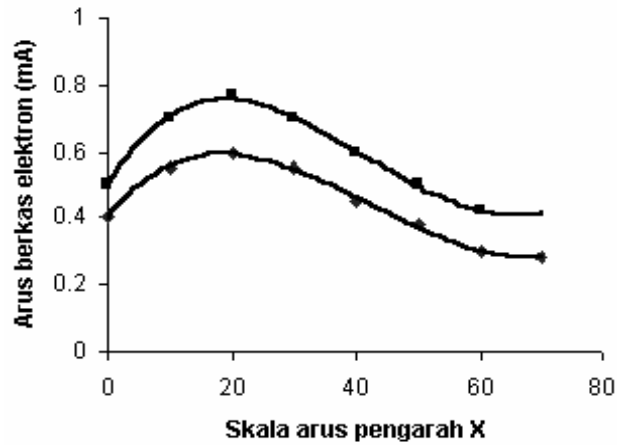


Gambar 4. Pergeseran fokus berkas terhadap perubahan arus pemfokus.

Koordinat (0, 0,3) menunjukkan pemfokusan berkas yang terjadi pada ujung atas magnet pemayaran MBE, sedangkan pada koordinat yang lain pemfokusan berkas telah bergeser dari ujung atas magnet pemayaran. Pergeseran dengan ordinat positif berarti pemfokusan berkas melebihi jarak 1m dari magnet pemfokus, mengakibatkan arus berkas tidak optimal. Pergeseran dengan ordinat negatif berarti pemfokusan berkas berada kurang dari 1 m dari magnet pemfokus, juga akan mengakibatkan arus berkas tidak optimal.

Optimasi Berkas Elektron Dengan Pengarahan-X

Pengarahan-X berkas elektron pada MBE 350 keV/10 mA berfungsi untuk menggeser berkas elektron ke arah x (arah horisontal tegak lurus arah pemayaran berkas). Sebagai gaya penggerak berkas digunakan medan magnet Helmholtz dengan inti besi yang dipasang tegak lurus arah berkas elektron. Untuk mencari kondisi optimal berkas elektron dilakukan variasi arus yang mengalir pada kumparan pengarahan-X. Data pengamatan ketika MBE dioperasikan pada energi elektron (290 ± 8) keV, arus filamen 11 A dengan tingkat kevakuman $(10 \pm 1) \times 10^{-6}$ Torr dan ketika energi elektron (330 ± 6) keV, arus filamen 11,3 A dengan tingkat kevakuman yang tetap, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

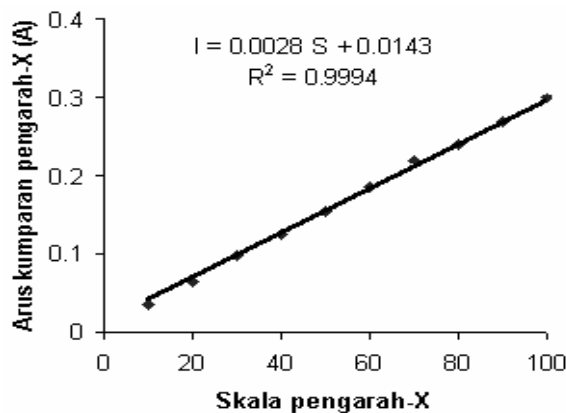


Gambar 5. Perubahan arus berkas elektron terhadap perubahan arus kumparan yang dibaca pada skala (nonius) pengarah-X.

Terlihat pada Gambar 5, kedua data menunjukkan pola yang mirip, seperti halnya sewaktu dilakukan pengamatan variasi arus pemfokusan terhadap perubahan arus berkas elektron. Arus berkas elektron bertambah ketika skala (nonius) pengatur arus kumparan magnet pengarah-X dinaikkan, pada skala pengarah-X 20 arus berkas elektron mencapai nilai maksimum. Nilai maksimum berkas elektron (ketika arus filamen 11 A) diperoleh sebesar 0,6 mA atau naik 50% dari arus berkas elektron awal. Sedangkan untuk arus filamen 11,3 A, arus berkas elektron maksimum 0,8 mA atau naik sebesar 60%. Penambahan skala arus pengarah-X selanjutnya mengakibatkan arus berkas elektron menurun dan kembali ke nilai arus berkas elektron semula pada skala 50. Penurunan arus berkas ini terus berlanjut dan dapat mencapai nilai di bawah arus berkas

elektron awal. Terjadinya perubahan arus berkas tersebut dapat dijelaskan karena adanya perubahan gaya Lorentz yang menggeser berkas ketika skala arus pengarah-X divariasasi.

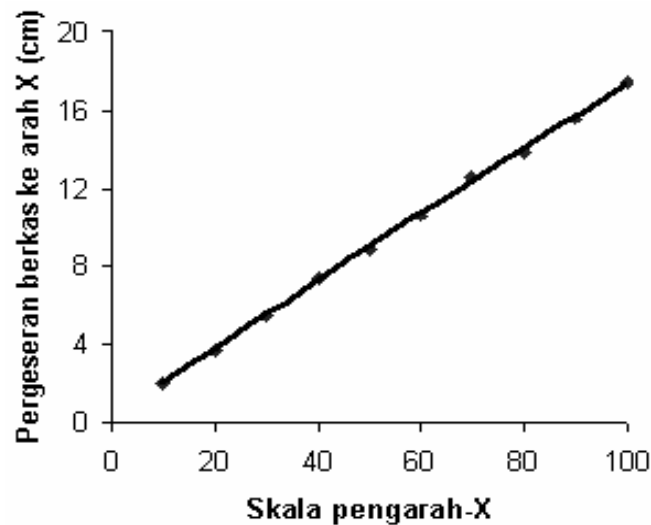
Untuk membahas data hasil pengamatan yang dikaitkan dengan pergeseran arah berkas elektron Δx akibat perubahan arus pengarah-X, diperlukan kalibrasi nilai skala S dengan arus I yang sebenarnya mengalir dalam kumparan magnet pengarah-X. Data kalibrasi ini ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil *fitting* arus I terhadap nilai skala S menggunakan metoda regresi linier diperoleh persamaan regresi $I = 0,0028 S + 0,0143$, dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,9994$. Nilai koefisien determinasi ini mendekati 1, yang berarti tingkat penyimpangan data pengamatan kecil.



Gambar 6. Kalibrasi skala arus dengan arus yang mengalir pada kumparan pengarah-X.

Medan magnet pada pengarah-X menghasilkan gaya Lorentz yang menggeser arah berkas elektron sebesar sudut α sesuai dengan persamaan (5). Jarak yang harus ditempuh berkas elektron untuk mencapai medan magnet pemayaran, setelah berkas elektron disimpangkan oleh medan magnet

pengarah-X, adalah 67,9 cm. Dengan demikian ketika berkas elektron memasuki medan magnet pemayaran tergeser sejauh $\Delta x = (67,9 \text{ tg } \alpha)$ cm. Hasil perhitungan pergeseran berkas elektron dalam arah horisontal tegak lurus arah pemayaran berkas seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pergeseran berkas elektron terhadap variasi skala pengarah-X, koordinat (20,3) merupakan posisi dimana arus berkas elektron maksimal.

Koordinat (20,3) merupakan posisi ketika arus berkas elektron maksimum. Berkas elektron mencapai maksimum ketika digeser sepanjang $\Delta x = 3$ cm atau pada skala pengarah-X 20. Dengan demikian diperkirakan berkas elektron awal miring $2,5^\circ$ terhadap sumbu tabung MBE. Kemiringan berkas ini berkurang jika pengarah-X dioperasikan pada skala tidak lebih dari 50. Tetapi akan lebih miring jika pengarah-X dioperasikan pada skala lebih dari 50. Tidak terlihat adanya data yang menunjukkan berkas elektron konstan ketika skala pengarah-X divariasikan, ini mengisyaratkan bahwa jika diasumsikan penampang lintang berkas elektron berupa lingkaran maka diameter berkas lebih besar dari pada lebar jendela pemayar.

KESIMPULAN

1. Arus berkas elektron bertambah jika pemfokusan dioperasikan pada arus tidak lebih dari 0,8 A dan akan diperoleh arus berkas maksimal jika arus pemfokusan sekitar 0,3 A. Arus berkas maksimal hanya akan diperoleh

jika titik pemfokusan pada ujung magnet pemayar, bukan di jendela corong pemayar. Dianjurkan untuk tidak mengoperasikan pemfokusan pada arus lebih dari 0,8 A.

2. Diperoleh data eksperimen yang meyakinkan bahwa berkas elektron miring dengan sudut sekitar $2,5^\circ$ terhadap sumbu tabung akselerator, sebelum berkas elektron diarahkan. Kemiringan berkas ini akan berkurang jika sistem pengarah-X dioperasikan pada skala arus tidak lebih dari 50 dan akan diperoleh berkas elektron maksimal jika arus pengarah-X pada skala 20. Dianjurkan untuk tidak mengoperasikan pengarah-X pada skala di atas 50.
3. Dengan menganggap penampang lintang berkas berupa lingkaran, diperoleh data yang mengisyaratkan bahwa diameter berkas lebih besar dari pada lebar jendela corong pemayar.
4. Untuk energi kinetik elektron sekitar 300 keV perhitungan secara relativistik sudah harus dilakukan, perhitungan klasik yang dilakukan

ketika berkas elektron terfokus menyimpang 20% dari data eksperimen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Bp. Suhartono Amd., Bp. Sumaryadi, teman sejawat yang telah banyak membantu dalam pengoperasian peralatan MBE, semoga amal ibadahnya mendapat balasan yang selayaknya dari Allah SWT. Amin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ANONIM, *Rancangan Dasar Sistem Optik Mesin Berkas Elektron 500 keV/20 mA*, Nomer Dokumen : 03/RD/MBE/PNY/04-97, PPNY, Yogyakarta, 1997.
- [2] SUTADJI SUGIARTO, dkk., *Perancangan Sistem Optik MBE 500 keV/10 mA*, Prosiding PPI Tek. Aks., Vol 1, No.1, 1999.
- [3] STANLEY HUMPHRIES, Jr., *Principles of Charged Particle Acceleration*, Department of electrical and computer engineering, Univ. of New Mexico, 1999.
- [4] DJOKO S. PUDJORAHARDJO, dkk., *Perhitungan Sistem Optik Mesin Berkas Elektron PPNY BATAN*, Prosiding PPI PPNY-BATAN, 1997.
- [5] SUDJATMOKO, *Perancangan Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA*, Seminar Sehari Perancangan Mesin Berkas Elektron 500

keV/10 mA, PPNY-BATAN, Yogyakarta, 1996.

TANYA JAWAB

Subarkah

- Dengan kemiringan berkas sekitar $2,5^\circ$, apakah tidak membahayakan MBE?

Tono Wibowo

- Selama ini belum diketahui adanya akibat yang dapat membahayakan MBE. Kemiringan berkas sekitar $2,5^\circ$ mengakibatkan pergeseran berkas pada arah X (arah horisontal yang tegak lurus arah pemyaran berkas) sekitar 3 cm. Bila tidak diluruskan (dengan pengarah-X) akibat nyata yang tampak adalah arus berkas menjadi tidak optimal.

Slamet Santosa

- Apakah berkas elektron ketika terfokus dapat berupa titik?

Tono Wibowo

- Tidak (bukan berupa titik), tetapi berkas terfokus pada suatu titik tertentu (posisi tertentu). Apabila berkas dapat terfokus sebagai titik tentunya akan diperoleh arus berkas elektron yang sangat besar, sebab kerapatannya menjadi besar. Hal ini tidak diperoleh dalam eksperimen dan begitu juga secara teori.