

## OPTIMASI ARUS BERKAS ELEKTRON DENGAN PENGARAH-Y DAN PEMAYAR MBE

Tono Wibowo, Slamet Santosa, Bambang Supardiyono

Puslitbang Teknologi Maju - BATAN

### ABSTRAK

*OPTIMASI ARUS BERKAS ELEKTRON DENGAN PENGARAH-Y DAN PEMAYAR MBE. Kondisi magnet pengarah-y dan pemayar berkas Mesin Berkas Elektron (MBE) mengakibatkan arus berkas optimum menjadi tujuan utama eksperimen ini. Karena itu parameter magnet pengarah-y dan pemayar divariasikan pada saat MBE beroperasi, yaitu arus berkas elektron diamati terhadap perubahan magnet pengarah-y dan pemayar. Sensor berkas diisolir dari pengaruh elektron terhambur agar mendapatkan pengukuran arus berkas yang benar, dan hasil perhitungan teori diacu sebagai pembandingan data eksperimen. Pada eksperimen ini diperoleh arus berkas maksimum pada skala magnet pengarah y 40, yang setara dengan arus kumparan pemayar 0,13 A dan menunjukkan berkas awal miring  $7^\circ$  ke arah y. Pada pengamatan di atas terdapat pergeseran berkas sepanjang 5,7 Cm dengan arus berkas konstan, dan setelah digabungkan dengan eksperimen terdahulu mengindikasikan penampang lintang berkas pada ujung corong pemayar berbentuk elip. Sumbu pendek elip maksimum 6,3 Cm dan sumbu panjang elip minimum 8 Cm. Pergeseran maksimum dari berkas electron energi 230 keV diperoleh pada tegangan pemayar 12 Volt atau setara dengan kuat medan magnet pemayar 33 Gauss, berbeda sekitar 15% dari hasil perhitungan teori.*

### ABSTRACT

*ELECTRON BEAM CURRENT OPTIMIZATION BY MEANS OF Y-STEERER AND EBM SCANNING. The condition of magnetic steerer on y direction and Electron Beam Machine (EBM) beam scanning causes the optimum of beam current is the subject of this experiment. For that reason, magnetic y-steerer and scanning parameters were varied while operation of the EBM, i.e. electron beam current was examined against the change of magnetic y-steerer and the scanning. The beam sensor is isolated from the influence of scattered electron in order to obtain a good current beam measurement and theoretical calculation is used as a comparison against experimental data. In this experiment, the maximum beam current is obtained at the scale of magnetic y-steerer as 40, which is proportional to the scanning coil of 0,13 A and it shows initial beam skew of  $7^\circ$  on y direction. In the above investigation there is an adjustment of the beam about 5.7 Cm length with constant beam current, and after combined with the previous experiment it indicates that the beam cross section at the end of scanning horn shaped an ellipse. Short axis maximum of the ellipse is 6.3 Cm and its long axis minimum is 8 Cm. Maximal adjustment of electron beam with the energy of 230 keV is obtained at the scanning voltage of 12 Volt, which is proportional with the scanning magnetic field strength of 33 Gauss, and it is diverse about 15% against theoretical calculation.*

### PENDAHULUAN

**M**esin Berkas Elektron (MBE) adalah akselerator elektron yang dapat menghasilkan elektron dengan energi kinetik lebih dari ratusan keV. Dengan energi kinetik dan arus berkas elektron yang semakin besar, semakin banyak manfaat yang dapat diperoleh<sup>[1]</sup>.

Sejak beberapa tahun yang lalu P3TM-BATAN telah berhasil membuat MBE dan sampai sekarang masih terus mengkaji dan mengembangkannya. Pada MBE, elektron berasal dari suatu sumber elektron, yang energinya masih rendah kemudian ditingkatkan dalam tabung pemercepat. Semula diharapkan, lintasan berkas

elektron pada MBE lurus sesumbu dengan tabung pemercepat. Tetapi data eksperimen menunjukkan bahwa lintasan berkas elektron setelah dipercepat miring ke arah-x sebesar 3 cm<sup>[2]</sup>.

Ada beberapa cara untuk meluruskan berkas, cara mekanik dengan mengeser sumbu tabung, dengan menggunakan medan listrik atau dengan menggunakan medan magnet. Di dalam makalah ini dikemukakan mengenai hasil pengamatan dari pengarah berkas menggunakan medan magnet. Dengan medan magnet ini perubahan arah berkas dengan mudah dapat dilakukan. Berkas elektron akan berinteraksi dengan medan magnet menghasilkan gaya Lorentz yang merubah gerak elektron<sup>[3]</sup>. Arah dan pergeseran berkas dapat ditentukan

dengan memvariasi besar dan arah medan magnet yang digunakan. Pengamatan berkas pada kondisi arus berkas optimum akan memberikan informasi yang berguna untuk mengkaji mengenai berkas elektron pada MBE.

Setelah berkas elektron keluar dari medan magnet pengarah, berkas menuju ke magnet pemayar. Di dalam magnet pemayar, berkas elektron dimayarkan (*scanning*) sehingga ketika berkas keluar dari jendela MBE dapat mengenai bahan sasaran secara meluas<sup>[4]</sup>. Peristiwa perubahan arah berkas elektron di dalam medan magnet pemayar tidak jauh berbeda dengan ketika berkas berada di dalam magnet pengarah. Bedanya, berkas elektron disimpangkan secara bolak-balik dalam magnet pemayar sedangkan di dalam magnet pengarah tidak. Hasil pengamatan sebelumnya diperoleh bahwa sudut penyimpangan berkas tidak berubah ketika medan magnet pemayar sampai pada tegangan pemayar 14 hingga 20 volt, dan berbeda menurut hasil perhitungan. Hal ini diduga karena ada elektron terhambur yang ditangkap oleh sensor berkas sehingga mengakibatkan pembacaan sensor berkas pada tegangan pemayar tersebut, sebagai penyimpangan berkas elektron maksimum<sup>[5]</sup>.

Di dalam eksperimen ini, pengaruh elektron terhambur terhadap pembacaan sensor berkas dihindari dengan mengisolasi sensor berkas. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan mengisolir sensor berkas, elektron terhambur tidak tertangkap oleh sensor berkas. Ditengarai dengan tidak adanya perubahan arus berkas ketika *beam stopper* dalam keadaan terbuka atau tertutup. Dalam eksperimen selanjutnya, dipelajari mengenai karakter dan kondisi optimal pemayar berkas MBE, dilakukan dengan cara pengamatan perubahan variasi medan magnet pemayar terhadap perubahan arus berkas dan dilakukan perhitungan untuk acuan dalam menganalisa data.

## DASAR TEORI

Elektron yang melewati suatu medan magnet geraknya akan dipengaruhi oleh gaya Lorentz. Gaya Lorentz yang dialami elektron tersebut dapat dituliskan dengan suatu persamaan gerak berdasarkan hukum Newton sebagai<sup>[6]</sup>

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

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

Jika medan magnet yang dilewati elektron berasal dari suatu kumparan magnet (Helmholtz), dengan arah medan tegak lurus arah berkas, maka berkas elektron menderita gaya Lorentz dan mengakibatkan berkas dibelokkan dengan sudut sebesar<sup>[3,4]</sup>

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

dengan  $N$  jumlah lilitan kumparan,  $I$  arus kumparan,  $L$  panjang magnet, dan  $V$  tegangan listrik penggerak elektron (tegangan pemercepat elektron),  $\mu_0$  permeabilitas vakum, dan  $g$  celah magnet. Setelah elektron keluar dari medan magnet, pada jarak  $L_1$ , berkas elektron akan tergeser searah gaya Lorentz sejauh,

$$\Delta y = L_1 \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

Jika elektron bergerak dengan kecepatan yang nilainya tidak dapat diabaikan terhadap kecepatan cahaya, maka koreksi relativistik harus dilakukan. Koreksi relativistik terhadap massa elektron yang bergerak adalah<sup>[6]</sup>

$$m = \gamma m_0 \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{U + m_0 c^2}{m_0 c^2} \quad (5)$$

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

Berdasarkan persamaan (1), gaya Lorentz yang dihasilkan oleh kumparan magnet pemayar akan menyimpangkan berkas elektron pada jendela MBE sejauh,

$$D = R(1 - \cos \alpha) + L_2 \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

dengan  $D$  jarak penyimpangan berkas,  $L_2$  jarak magnet pemayar ke jendela pemayar.  $R = L_1 / \sin \alpha$ , jejari kelengkungan Lorentz yang dapat juga dirumuskan sebagai,

$$R = \frac{(2 m_0 V \gamma / e)^{0.5}}{B} \quad (7)$$

dengan  $L_1$  panjang magnet pemayar,  $B$  medan magnet pemayar<sup>[4]</sup>.

## TATAKERJA

Pada eksperimen ini, berkas elektron diarahkan dengan medan magnet yang menghasilkan gaya Lorentz, persamaan (1), ke arah-y. Optimasi arus berkas elektron dengan pengarah-y dilakukan pada peralatan MBE di P3TM. Multimeter digital sebagai alat bantu digunakan untuk kalibrasi angka skala magnet dengan arus yang mengalir pada kumparan magnet. MBE dioperasikan dengan langkah sesuai petunjuk operasi yang ada dan dilakukan oleh operator MBE. Skema langkah gerak elektron dalam eksperimen ini ditunjukkan sebagai anak panah dalam Gambar 1.

Pada kondisi MBE beroperasi, elektron 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 masuk ke dalam magnet pemfokus kemudian menuju ke magnet pengarah. Di dalam magnet pengarah ini, berkas elektron digeser ke arah-y dengan mem-variasi angka skala magnet pengarah-y. Arus berkas elektron diamati pada sensor berkas di bawah jendela MBE sebagai fungsi angka skala magnet. Kalibrasi angka skala magnet dengan arus kumparan dilakukan dengan multimeter digital dan hasilnya digunakan sebagai acuan sewaktu dilakukan perhitungan teori.

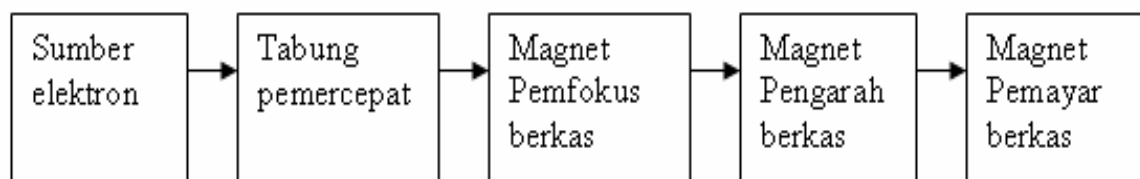
Setelah melewati medan magnet pengarah elektron menuju ke medan magnet pemayar, elektron disimpangkan secara periodik dalam medan magnet ini, elektron kemudian keluar dari jendela pemayar. Arus berkas elektron yang keluar dari jendela pemayar dan berada pada sensor di batas penyimpangan maksimum diamati sebagai fungsi angka skala magnet pemayar. Perhitungan teori dilakukan berdasar data kalibrasi angka skala dengan arus kumparan dan arus kumparan dengan medan magnet pemayar.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

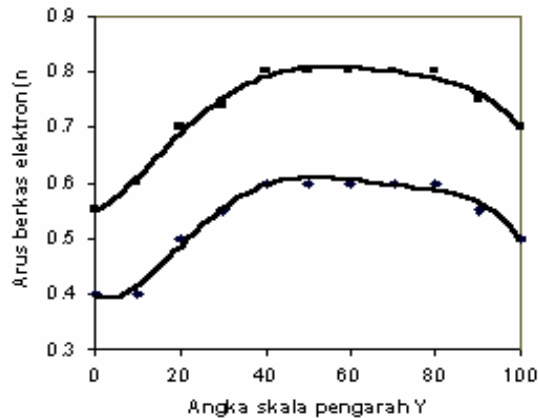
## Optimasi Berkas elektron Dengan Pengarah-y

Pengarah-y berkas elektron pada MBE di P3TM berfungsi untuk menggeser berkas elektron ke arah y (arah horisontal sejajar 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 pengarah-y. Data pengamatan ketika MBE dioperasikan pada energi elektron  $(300 + 7)$  keV, arus filamen 11 A dan 11,3 A dengan tingkat kevakuman  $(9 + 1) \times 10^{-6}$  Torr ditunjukkan pada Gambar 2.

Terlihat pada Gambar 2, arus berkas elektron bertambah dengan kenaikan angka skala kumparan magnet pengarah-y sampai dengan angka 40, seterusnya hampir tidak berubah sampai angka 80. Kenaikan skala berikutnya tidak menghasilkan penambahan arus berkas elektron. Berkas elektron mencapai optimum pada angka skala 40, seterusnya konstan hingga skala 80. Dalam jangkau skala ini, pada arus filamen 11,0 A, terjadi penambahan arus berkas sebesar 70% dari nilai awal dan sekitar 92% ketika arus filamen dinaikkan menjadi 11,3 A. Hasil ini berbeda dengan data pengarahkan berkas ke arah x yang pernah dilakukan sebelumnya[2]. Perbedaan yang perlu diperhatikan adalah ketika angka skala pengarah-y dinaikkan sampai berkas elektron optimum, kenaikan skala berikutnya tidak segera mengakibatkan berkas menurun tetapi berkas elektron konstan pada jangkau skala tertentu (40 – 80). Perbedaan ini wajar karena medan magnet pada pengarah-y berinteraksi dengan elektron menghasilkan gaya Lorentz ke arah y, persamaan (1). Arah y sejajar sumbu panjang sedangkan arah x sejajar sumbu pendek jendela MBE. Akibatnya, kemungkinan pergeseran berkas ke arah-y ( $\Delta y$ , persamaan 3) menjadi lebih besar dibanding pergeseran ke arah-x ( $\Delta x$ ), sebelum berkas akhirnya tergeser hingga menabrak dinding pemayar. Untuk mengkaji posisi pergeseran berkas yang terjadi, diperlukan data kalibrasi angka skala dengan arus yang mengalir pada kumparan pengarah-y.

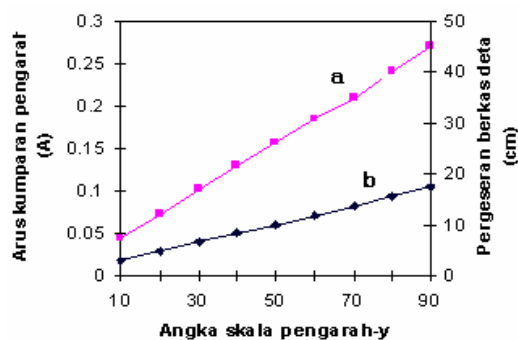


Gambar 1. Skema perjalanan elektron dalam MBE.



**Gambar 2. Perubahan arus berkas elektron terhadap perubahan arus kumparan yang dibaca pada angka skala pengarah-y.**

Pada Gambar 3 ditunjukkan data kalibrasi angka skala (S) dengan arus kumparan pengarah-y (I), terlihat data kalibrasi linier mengikuti persamaan regresi  $I = 0,0028 S + 0,0165$  dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0,9998$ . Berdasarkan hasil kalibrasi ini, pergeseran berkas yang dihitung dengan Persamaan (2), (3) dan (4) dengan memasukkan nilai  $L_f = 76,4$  cm, pada energi elektron 300 keV, diperoleh hubungan angka skala pengarah dengan pergeseran berkas elektron ke arah-y  $\Delta y$  seperti ditunjukkan pada Gambar 3b, data linier mengikuti persamaan regresi  $\Delta y = 0,1857 S + 0,6735$  dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0,9981$ .



**Gambar 3. (a) Kalibrasi angka skala terhadap arus kumparan pengarah-y; (b) Hubungan angka skala pengarah-y dengan pergeseran berkas  $\Delta y$ .**

Pada jangkau skala S 40 – 80 yang setara dengan arus kumparan pengarah-y I 0,13 – 0,24 A

akan menggeser berkas elektron dengan sudut  $\alpha$   $4,9 - 9,1^0$  terhadap arah berkas awal, sehingga mengakibatkan berkas tergeser ke arah-y sebesar  $\Delta y$  dari 6,5 cm sampai dengan 12,2 cm. Berkas menempuh pergeseran sepanjang 5,7 cm. Dengan demikian sebelum berkas diarahkan, diduga berkas miring ke arah-y sekitar  $7^0$  atau perlu digeser ke arah-y sepanjang  $\Delta y = 9,4$  cm supaya diperoleh arus berkas elektron optimum. Hasil eksperimen yang pernah dilakukan sebelumnya menunjukkan kemiringan berkas ke arah-x sebesar  $2,5^0$  atau berkas perlu digeser ke arah-x sepanjang  $\Delta x = 3$  cm supaya diperoleh arus berkas elektron optimum [2]. Kedua hasil pengamatan tersebut telah dapat diperkirakan kurang dari 6,3 cm. Hasil eksperimen pengarah berkas ke arah-x yang pernah dilakukan sebelumnya mengisyaratkan bahwa diameter berkas elektron lebih besar atau sama dengan lebar ujung corong pemayar [2]. Jika kedua hasil tersebut dipadukan maka dapat diduga penampang lintang berkas elektron MBE, pada ujung corong pemayar, berbentuk elip dengan sumbu pendek maksimum 6,3 cm dan sumbu panjang minimum 8 cm.

### Optimasi Pemayaran Berkas

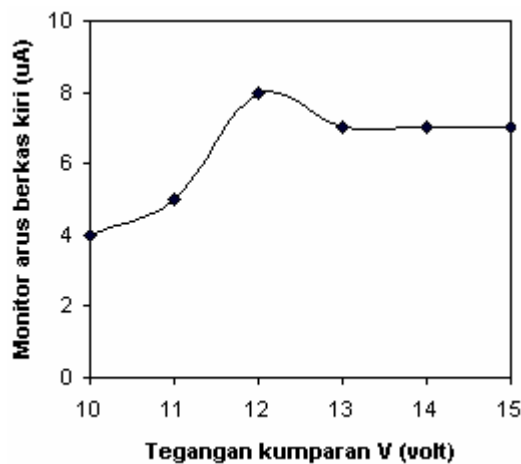
Pemayaran berkas elektron pada MBE dilakukan oleh medan magnet bolak-balik yang dipasang tegak lurus arah berkas. Gaya Lorentz yang dihasilkan menyimpangkan berkas elektron secara bolak-balik sehingga berkas elektron dapat mengenai bahan yang berada di bawah jendela secara meluas [4]. Sudut penyimpangan berkas dapat ditentukan bergantung pada besar medan magnet pemayar, mengikuti Persamaan (2).

Hasil pengujian sistem pemayar yang pernah diperoleh terdahulu pada energi elektron 200 keV menunjukkan bahwa: Sudut penyimpangan berkas  $\alpha$  tidak berubah meskipun tegangan catu daya pemayar dirubah dari 14 sampai dengan 20 volt. Dikemukakan pula bahwa: Pada tegangan catu daya pemayaran 14 volt berkas elektron sebenarnya belum disimpangkan pada batas penyimpangan maksimum, ada elektron terhambur yang ditangkap oleh sensor berkas sehingga terbaca oleh sensor sebagai penyimpangan berkas maksimum [5].

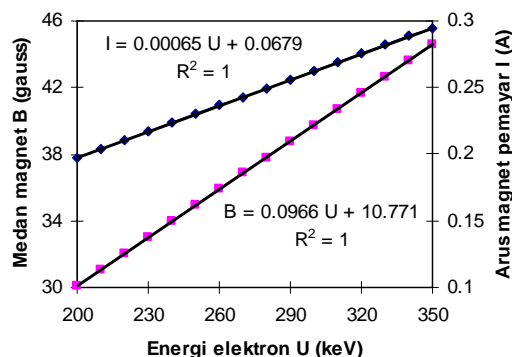
Di dalam eksperimen ini, pada tepi kanan-kiri bawah jendela MBE dipasang sensor berkas yang diisolir dari pengaruh hamburan elektron. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa dengan mengisolasi sensor berkas, elektron terhambur yang ditangkap oleh sensor dapat dikurangi. Ditengarai dengan tidak adanya perubahan arus berkas ketika *beam stopper* dalam keadaan terbuka atau tertutup. Dengan demikian untuk selanjutnya, sensor berkas

terisolir diyakini hanya akan menangkap berkas elektron MBE. Hasil pengamatan perubahan arus berkas terhadap perubahan tegangan kumparan pemayar pada energi elektron 230 keV, arus filamen 11,6 ditunjukkan dalam Gambar 4.

Dalam Gambar 4 dapat dilihat, pada tegangan kumparan 14 volt atau lebih arus berkas elektron tampak konstan. Hasil ini sesuai dengan hasil yang pernah diperoleh sebelumnya<sup>[5]</sup>. Perubahan sudut penyimpangan berkas  $\alpha$  tidak teramati pada tegangan kumparan  $\geq 14$  volt. Tetapi tidak berarti pada tegangan kumparan pemayar 14 volt, berkas belum disimpangkan pada batas penyimpangan maksimum. Ditunjukkan pada Gambar 5, data hasil perhitungan besar medan magnet yang diperlukan untuk memayarkan berkas elektron MBE pada batas penyimpangan maksimum sebagai fungsi energi elektron, berdasarkan Persamaan (6) dan (7).



**Gambar 4.** Perubahan arus berkas elektron pada sensor tepi berkas terhadap perubahan tegangan kumparan pemayar MBE.

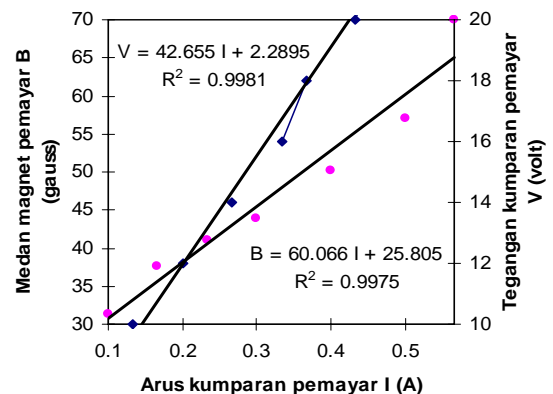


**Gambar 5.** Grafik medan magnet B, arus magnet pemayar I yang dibutuhkan

### kan untuk menyimpangkan berkas elektron energi U pada simpangan maksimum MBE.

Pada Gambar 5 dapat dilihat, dengan energi elektron semakin besar, semakin besar pula medan magnet yang dibutuhkan untuk penyimpangan maksimum berkas elektron. Pada energi elektron 200 keV dan 230 keV, berkas elektron mencapai batas penyimpangan maksimum bila medan magnet pemayar, berurut sebesar 30 gauss dan 33 gauss. Masing-masing setara dengan arus kumparan pemayar sebesar 0,2 A dan 0,22 A.

Untuk mengetahui medan magnet yang dihasilkan kumparan pemayar MBE pada tegangan 14 volt, kalibrasi tegangan kumparan terhadap arus kumparan dan pengukuran magnet pada beberapa variasi arus kumparan perlu dilakukan. Hasil kalibrasi dan pengukuran ini ditunjukkan dalam Gambar 6, pada tegangan  $V=14$  volt diperoleh setara dengan arus  $I = 0,27$  A, menghasilkan medan magnet sebesar 42 gauss. Medan magnet ini lebih besar dari pada medan magnet yang dibutuhkan untuk penyimpangan maksimum berkas, baik untuk energi elektron 200 keV maupun 230 keV.

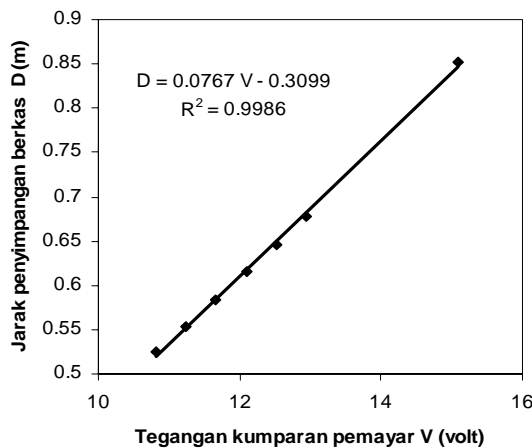


**Gambar 6.** Grafik medan magnet B yang dihasilkan oleh magnet pemayar MBE pada arus kumparan I dan tegangan pemayar V.

Pada tegangan kumparan 13 volt atau setara dengan arus 0,25 A menghasilkan medan magnet pemayar sebesar 41 gauss, melebihi medan magnet yang dibutuhkan untuk penyimpangan maksimum berkas pada energi 230 keV. Dengan demikian, hasil eksperimen ini sesuai dengan perhitungan teori.

Apabila medan magnet pemayar yang dihasilkan melebihi medan magnet yang dibutuhkan

untuk penyimpangan maksimum berkas, maka akan dapat mengakibatkan timbulnya panas pada dinding corong pemayar. Dinding akan tertabrak oleh berkas elektron sehingga terjadi pemindahan energi elektron ke dinding yang diwujudkan dalam bentuk panas. Pemanasan yang berlebih pada dinding pemayar akan dapat mempercepat kerusakan dinding dan komponen lain yang melekat pada dinding. Di samping itu, efisiensi berkas menjadi berkurang dengan adanya berkas yang menabrak dinding. Pada Gambar 4 dapat dilihat, pemayaran yang menunjukkan arus berkas maksimum diperoleh pada tegangan kumparan 12 volt, untuk energi elektron 230 keV. Tegangan pemayar lebih dari 12 volt mengakibatkan ada sebagian berkas menabrak dinding sedangkan kurang dari 12 volt penyimpangan berkas tidak sampai batas maksimum. Perkiraan jarak penyimpangan berkas elektron energi 230 keV jika magnet pemayar dioperasikan pada tegangan kurang dari 12 volt ditunjukkan dalam Gambar 7.



**Gambar 7. Grafik Jarak penyimpangan berkas terhadap tegangan pemayar V, pada energi elektron 230 keV.**

Pada tegangan kumparan 12 volt, arus yang mengalir pada kumparan pemayar 0,23 A, menghasilkan medan magnet 39 Gauss. Sedangkan medan magnet yang dibutuhkan untuk penyimpangan maksimum berkas pada energi 230 keV adalah 33 gauss. Dengan demikian terdapat perbedaan sekitar 15 %, perbedaan yang disebabkan oleh ketidak pekaan voltmeter pemayar. Voltmeter pemayar perlu diganti dengan yang lebih peka.

## KESIMPULAN

1. Berkas elektron MBE miring sebelum diarahkan, ditengarai dengan pencapaian arus berkas maksimum setelah skala pengarah-y dinaikkan pada skala 40.
2. Setelah berkas elektron digeser 4,9° sampai dengan 9,1° arus berkas tidak berubah, maka diperkirakan kemiringan berkas sebesar 7° (ke arah-y), supaya berkas elektron menjadi lurus harus digeser ke arah-y sejauh 9,4 cm.
3. Diperoleh kondisi dimana arus berkas konstan pada pergeseran sejauh 5,7 cm, dengan memperhatikan ruang gerak berkas dan hasil eksperimen terdahulu, diperkirakan penampang lintang berkas elektron di ujung corong pemayar, berbentuk elip dengan sumbu pendek maksimum 6,3 cm dan sumbu panjang minimum 8 cm.
4. Pada tegangan kumparan magnet pemayar 12 volt diperoleh arus berkas elektron maksimum, elektron terhambur tidak terbaca pada sensor berkas, maka dapat diyakini bahwa pada tegangan pemayar 12 volt berkas elektron dengan energi 230 keV disimpangkan pada batas maksimum.

## 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 dari Allah SWT. Amin.

## DAFTAR PUSTAKA

1. SUDJATMOKO, *Perancangan Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA*, Seminar Sehari Perancangan Mesin Berkas Elektron 500 keV/10 mA, PPNY-BATAN, Yogyakarta, 1996.
2. TONO WIBOWO, dkk, *Optimasi Arus Berkas Elektron Dengan Pemfokusan dan Pengarahan-X Pada MBE 350 keV/10 mA*, Prosiding PPI Tek. Aks., P3TM-BATAN, Yogyakarta, 2004.
3. SUTADJI SUGIARTO, dkk., *Perancangan Sistem Optik MBE 500 keV/10 mA*, Prosiding PPI Tek. Aks., Vol 1, No.1, 1999.
4. DJOKO S. PUDJORAHARDJO, dkk., *Perhitungan Sistem Optik Mesin Berkas Elektron PPNY BATAN*, Prosiding PPI PPNY-BATAN, 1997.

5. TONO WIBOWO, dkk, *Penyempurnaan dan Uji Sistem Pemayaran MBE 350 keV/10 mA*, Prosiding PPI P3TM-BATAN, Yogyakarta, 2004.
6. STANLEY HUMPHRIES, Jr., *Principles of Charged Particle Acceleration*, Department of electrical and computer engineering, Univ. of New Mexico, 1999.

---

## TANYA JAWAB

### Agus Purwadi

- Dijelaskan bahwa sebelum berkas elektron diluruskan dengan magnet pengarah, berkas electron miring (tidak sesumbu) dengan sumbu tabung pemercepat. Seandainya berkas tidak diluruskan apakah akan merusak MBE?

### Tono Wibowo

- *Kemiringan berkas elektron yang terjadi pada MBE (sebelum diarahkan) bila tidak diluruskan tidak merusak MBE. Hanya saja pada dinding corong pemayar menunjukkan temperatur yang lebih tinggi dibanding pada sisi corong yang*

*lain. Hal ini diakibatkan oleh sebagian berkas elektron yang menabrak dinding corong. Selain itu, mengakibatkan arus berkas elektron tidak optimum.*

### Subarkah

- Jika energi elektron semakin besar, bagaimana pengaruhnya terhadap lebar pemayaran?
- Apakah frekuensi medan magnet pemayar berpengaruh terhadap dosis radiasi yang diterima bahan?

### Tono Wibowo

- *Lebar pemayaran berkas elektron MBE dipengaruhi oleh medan magnet pemayar dan energi elektron. Apabila medan magnet pemayar tetap, maka dengan energi elektron menaik lebar pemayaran berkas akan menurun. Tetapi, apabila medan magnet pemayar menaik energi elektron tetap maka lebar pemayaran akan menaik pula.*
- *Frekuensi medan magnet pemayar tidak berpengaruh terhadap besar dosis radiasi yang diterima bahan tetapi berpengaruh terhadap homogenitas dosis radiasi.*