

PENYEBARAN ARUS BERKAS ELEKTRON PADA SISTEM PEMERCEPAT ELEKTROSTATIK

Slamet Santosa, Suprpto, Djoko S. Pudjorahardjo

Puslitbang Teknologi Maju - Batan

ABSTRAK

PENYEBARAN ARUS BERKAS ELEKTRON PADA SISTEM PEMERCEPAT ELEKTROSTATIK. Dibahas pengaruh medan sendiri terhadap arus berkas elektron yang bergerak pada medan elektrostatik dari sistem pemercepat. Gaya Lorentz yang ditimbulkan oleh medan magnet tersebut saling berlawanan dengan gaya elektrostatik dari muatan ruang pada sepanjang arus berkas yang bergerak secara kontinu pada medan elektrostatik dengan rotasi yang simetris. Resultan gaya-gaya tersebut menimbulkan pengaruh pada penyebaran secara radial dari arus berkas elektron sepanjang lintasannya pada struktur pemercepat, yang pada daerah kecepatan relativistik dari berkas elektron pengaruh gaya-gaya tersebut menjadi lebih kecil. Komponen radial akibat medan elektrostatik pemercepat dan medan magnet sendiri tersebut berpengaruh pada sebaran radial dari berkas elektron, sehingga penyelesaian persamaannya dapat digunakan untuk memprediksi ukuran berkas elektron dan sebarannya ketika melintas pada medan elektrostatik pemercepat dan memungkinkan untuk memilih suatu pemandu berkas dari sistem pemercepat berkas elektron.

Kata kunci: Tabung pemercepat, medan elektrostatik, gaya Lorentz, berkas elektron

ABSTRACT

THE DIVERGENCE OF ELECTRON BEAM CURRENT ON ELECTROSTATIC ACCELERATING SYSTEM. In this paper, the influence of self-field toward current electron beam on motion in electrostatic accelerating field system is described. Lorentz force caused of magnetic field competes with electrostatic force of the space charge during travelling of continuous current beam in electrostatic field with rotational symmetry. Resultant of the forces give an effect on radial spreading of the electron beam current along the trajectory on accelerating structure, which upon the area of relativistic velocity of electron, the influence of the forces become lower. Radial components caused by electrostatic accelerating fields and magnetic fields give an influence on radial divergence of the electron beam and thus its solving equations allows to predict the size of the electron beam and its divergence during passing through electrostatic accelerating field and enables to choose a beam guide of an accelerating system.

Key words: Accelerating tube, electrostatic field, Lorentz force, electron beam

PENDAHULUAN

Diketahui bahwa partikel bermuatan yang bergerak, dalam hal ini adalah elektron, menimbulkan medan magnet di sekitar arus partikel bermuatan tersebut^[1]. Untuk arus partikel bermuatan pada kawat penghantar lurus, medan magnet menimbulkan garis-garis gaya konsentris di sekitar kawat pada bidang yang tegak lurus dengan medan magnet tersebut. Menurut hukum Ampere, kuat medan magnet berkurang pada titik-titik dengan jarak dari pusat penghantar yang bertambah besar. Hukum Ampere juga berlaku untuk partikel bermuatan yang bergerak pada ruang vakum^[2,3]. Fenomena tersebut memberikan kenyataan bahwa terjadi penyebaran sendiri (*self-divergence*) pada arus berkas partikel bermuatan. Medan magnet yang

ditimbulkan oleh arus berkas partikel bermuatan menimbulkan gaya magnet pada partikel-partikel bermuatan itu sendiri pada arah radial dan mengikuti hukum Ampere. Pada akselerator elektron, elektron bergerak dan dipercepat karena adanya gaya-gaya yang ditimbulkan oleh medan elektrostatik akibat diberikannya tegangan listrik searah pada sistem pemercepat. Sehingga penyebaran berkas elektron secara radial pada sistem pemercepat antara lain terjadi karena interaksi antara gaya listrik yang ditimbulkan oleh medan listrik dari sistem pemercepat dengan gaya magnet yang ditimbulkan oleh medan magnet akibat arus berkas elektron. Adanya gaya listrik dan gaya magnet tersebut, di dalam arus berkas elektron yang mengalir timbul komponen-komponen gaya yang mempengaruhi lintasan berkas elektron ke arah

radial, yang berpengaruh pada arah azimut dari berkas elektron sepanjang lintasannya. Beda potensial pada sistem pemercepat akan menghasilkan energi kinetik, dan dengan kecepatan awal dari berkas elektron yang lebih besar, yang didapat dengan cara menaikkan tegangan pada elektroda metal pertama dari sistem pemercepat, pengaruh gaya-gaya tersebut menjadi lebih kecil. Lebih lanjut, pada tegangan pemercepat yang lebih besar, energi kinetik yang dihasilkan akan menimbulkan percepatan sehingga arus berkas elektron memungkinkan mencapai daerah kecepatan relativistik. Pada program simulasi yang dipergunakan, komponen gaya-gaya tersebut diperhitungkan dengan melibatkan faktor relativistik dan kecepatan berkas elektron adalah kecepatan relatif terhadap kecepatan cahaya.

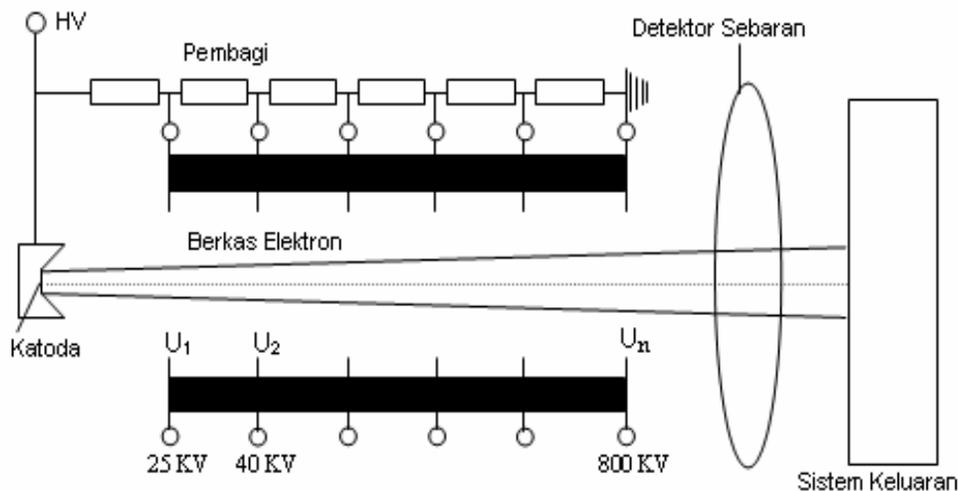
Pada penelitian ini telah dilakukan simulasi komputer tentang pengaruh medan magnet sendiri pada arus berkas elektron silindris yang mengalir pada medan listrik serba sama di dalam tabung pemercepat dari suatu akselerator elektron. Simulasi dilakukan dengan program komputer yang ditulis dengan bahasa Fortran (beberapa *function* ditulis dengan bahasa C) di *Soltan Institute for Nuclear Studies, Swierk, Poland*. Simulasi dilakukan dengan batasan sistem yang terdiri sumber elektron, tabung pemercepat elektrostatik dan sistem keluaran untuk absorbsi energi berkas. Dengan demikian dapat diasumsi bahwa simpangan berkas elektron secara radial hanya dipengaruhi oleh medan listrik pada muatan ruang, yang ditimbulkan oleh sistem pemercepat dan medan magnet yang ditimbulkan oleh arus berkas elektron. Tujuan dari simulasi ini adalah mendapatkan data-data yang memungkinkan

dipakai untuk memprediksi parameter-parameter berkas elektron pada sistem pemercepat elektrostatik yang diperlukan pada pengembangan disain sistem tabung pemercepat, sehingga memungkinkan untuk dipilih sistem pemandu berkas elektron yang lebih baik dan efisien.

TATA KERJA

Konfigurasi Sistem

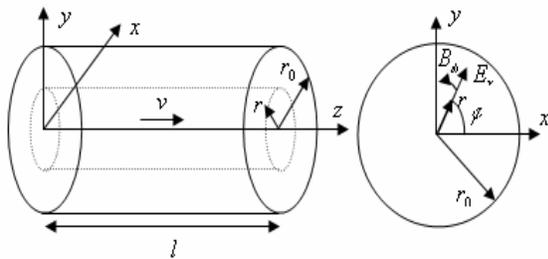
Konfigurasi sistem pemercepat yang dipergunakan sebagai obyek untuk melakukan simulasi komputer ini adalah seperti pada Gambar 1. Sumber elektron yang dipakai pada akselerator elektron tersebut adalah tipe *Pierce*, yang menghasilkan elektron pada katode menggunakan sistem emisi termionic. Dengan sumber elektron tipe ini, berkas elektron meninggalkan katoda dapat dijamin hampir sejajar dengan sistem optik sumbu aksial dan berbentuk silindris^[4]. Sehingga kondisi awal berkas elektron sebelum melalui sistem pemercepat, simpangan radialnya nol. Elektroda-elektroda metal dari struktur tabung pemercepat terdiri dari 32 buah elemen pemercepat yang masing-masing berjarak 28 mm dan dicatu tegangan tinggi melalui resistor-resistor pembagi tegangan (*voltage divider resistors*). Pada sistem yang disimulasi dipasang detektor sebaran berkas elektron yang berfungsi untuk mengukur diameter berkas elektron yang mengalir setiap saat. Sistem keluaran berfungsi untuk mengabsorpsi energi berkas elektron, yang dapat terbuat dari sembarang target.



Gambar 1. Sistem pemercepat berkas elektron.

Perhitungan Parameter Untuk Simulasi

Partikel bermuatan di dalam ruang vakum dari sistem pemercepat adalah berkas elektron berbentuk silinder yang bergerak di dalam medan listrik serba sama pada tabung pemercepat yang dipengaruhi medan magnet, yang ditimbulkan oleh arus berkas dan dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri berkas elektron.

Tampang lintang berkas elektron berjari-jari r_0 dengan kerapatan muatan yang serba-sama bergerak dengan kecepatan v pada arah sumbu aksial z . Komponen gaya akibat adanya medan magnet adalah B_ϕ dan komponen gaya akibat adanya medan listrik adalah E_r yang masing-masing memberikan pengaruh pada berkas elektron yang bergerak di dalam silinder tabung pemercepat. Pencatatan tegangan tinggi pada struktur tabung pemercepat dapat diregulasi, sehingga memungkinkan diberikannya tegangan pemercepat yang bervariasi di bawah tegangan dadal dari elektroda metal yang digunakan.

Simulasi dilakukan dengan pemrograman komputer dengan parameter-parameter perubah radial terhadap arus berkas sebagai berikut. Menurut hukum Gauss dan Ampere, muatan listrik dari tegangan pemercepat menghasilkan medan listrik E dan arus berkas menghasilkan medan magnet B . Interaksi dari keduanya dapat terjadi di luar dan di dalam silinder berkas, dan masing-masing akan menimbulkan komponen perubah radial E_r dan komponen perubah pada sudut azimut B_ϕ pada setiap saat sepanjang lintasan berkas elektron l . Karena pengaruh medan magnet B di luar silinder berkas sangat kecil, maka pengaruhnya pada komponen perubah pada sudut azimut sangat kecil dan dapat diabaikan^[4]. Harga E_r dan B_ϕ di dalam silinder berkas dengan $r \leq r_0$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$E_r = (\rho / 2 \epsilon_0) r = \{ I / (2\pi \epsilon_0 v) \} (r / r_0^2) \quad (1)$$

$$B_\phi = (v\rho / 2\epsilon_0 c^2) r = \{ I / (2\pi \epsilon_0 c^2) \} (r / r_0^2) \quad (2)$$

dengan $c = 1/\sqrt{\mu \epsilon_0}$ adalah kecepatan cahaya, v adalah kecepatan berkas elektron, μ_0 dan ϵ_0 masing-masing adalah permeabilitas dan permitivitas ruang vakum dan ρ adalah distribusi muatan serba sama. Sehingga total gaya-gaya di dalam silinder berkas dapat dihitung sebagai berikut:

$$F = e(E + (vB)) = (e \rho / 2 \epsilon_0) (1 - v^2 / c^2) r \quad (3)$$

dengan e adalah muatan elektron. Dengan substitusi $\beta = v/c$, total gaya-gaya yang bekerja adanya interaksi medan elektrostatis dan medan magnet di dalam silinder berkas dapat dihitung sebagai berikut:

$$F = (e\rho / 2\epsilon_0)(1 - \beta^2) r = eI / (2\pi\epsilon_0) k(v)(r / r_0^2) \quad (4)$$

dengan $k(v) = (1 - \beta^2) / \beta$ adalah faktor kecepatan relativistik dari gerak partikel bermuatan pada tabung pemercepat.

Persamaan pada daerah kecepatan relativistik dihitung dengan menggunakan persamaan energi pada potensial medan U dan transformasinya dalam bentuk energi kinetik K , sebagai berikut:

$$mc^2 = m_0c^2 + eU \Leftrightarrow K = m_0c^2 \gamma - m_0c^2 \quad (5)$$

dengan $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ dan $m_0c^2 = 511$ keV. Faktor $k(v)$ adalah fungsi energi kinetik yang dihasilkan eU dan pada daerah relativistik dengan harga $k(v)$ bertambah besar dan berbanding lurus terhadap kecepatan relatif berkas elektron pada daerah relativistik. Kecepatan relatif berkas elektron pada daerah relativistik dihitung dengan $v = \frac{1}{\gamma}(\gamma^2 - 1)^{1/2} c$. Karena pada daerah

kecepatan relativistik kecepatan berkas elektron menjadi lebih besar, maka total gaya-gaya yang berpengaruh pada berkas elektron dalam medan elektrostatis menjadi lebih kecil^[5,6].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada program simulator yang dipakai menggunakan persamaan Laplace pada perhitungan gaya-gaya di dalam sistem pemercepat dan diselesaikan dengan metode *finite different*,

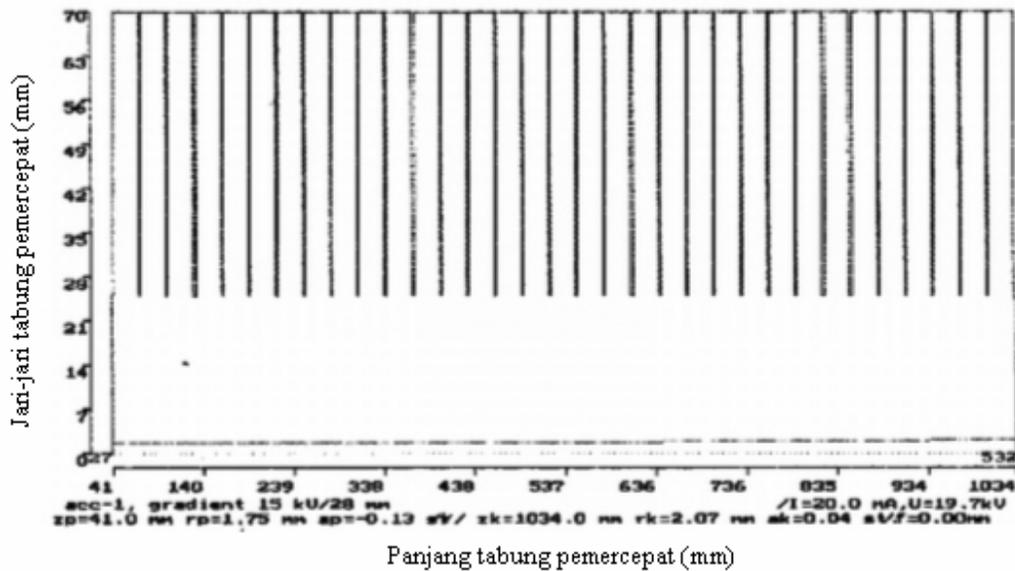
sedangkan persamaan integrasi pada daerah kecepatan relativistik diselesaikan dengan metode *Runge-Kutta*. Simulasi dilakukan pada sistem dengan 32 buah struktur pemercepat yang masing-masing berjarak 28 mm dan gradien tegangan 15 kV dan dilakukan pada berbagai macam besaran potensial medan U pada elektroda pertama dari sistem pemercepat. Potensial medan pada elektroda pertama dari sistem pemercepat dan tegangan anoda pada sumber ion menentukan kecepatan awal dari arus berkas elektron. Potensial medan pada elektroda kedua dan seterusnya bertambah besar

dengan gradien tegangan tertentu, sehingga kecepatan berkas elektron juga bertambah besar. Hal demikian akan mengurangi pengaruh gaya-gaya ke arah radial pada tabung pemercepat. Simulasi dilakukan dengan melibatkan pengaruh medan magnet sendiri (*self-field*) yang ditimbulkan oleh arus berkas elektron. Data-data simulasi dan perhitungan kecepatan awal berkas relativistik ditampilkan pada tabel sebagai berikut, dengan r_k adalah diameter masukan berkas elektron dan r_p adalah diameter keluaran berkas elektron:

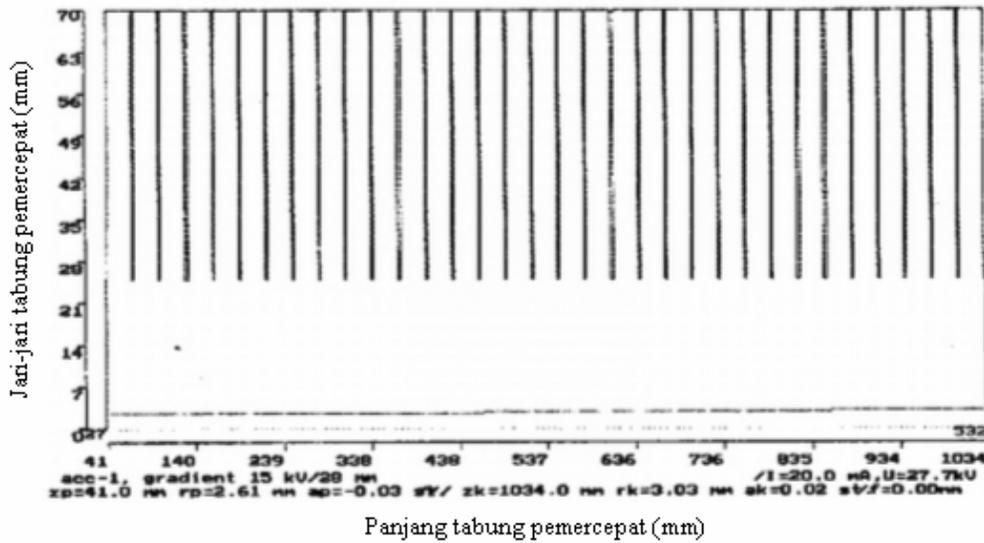
No.	U -anoda (kV)	K (keV)	gamma	v -relativistik	$r_k - r_p$ (mm)
1.	0,66	15,66	1,0306	0,2419 C	34,66
2.	2,66	17,66	1,0346	0,2565 C	0,83
3.	4,66	19,66	1,0385	0,2698 C	0,32
4.	6,66	21,66	1,0424	0,2823 C	0,30
5.	8,66	23,66	1,0463	0,2942 C	0,26

Dari data-data keluaran simulasi, dengan diberikannya tegangan pada elektrode metal tingkat pertama dari sistem pemercepat yang lebih besar, didapat kecepatan relatif berkas elektron yang semakin besar. Hal tersebut memungkinkan karena energi kinetik pada sistem pemercepat bertambah besar. Dengan kecepatan awal berkas elektron yang lebih besar, pengaruh komponen radial gaya-gaya semakin kecil.

Hasil simulasi arus berkas elektron pada keluaran sistem pemercepat diberikan dengan gambar lintasan berkas elektron. Simulasi dilakukan dengan melibatkan pengaruh medan sendiri yang ditimbulkan oleh arus berkas elaktron dan tanpa melibatkannya.



Gambar 3. Lintasan elektron dengan melibatkan pengaruh *self-field* dan $U_1 = 19,7$ kV.

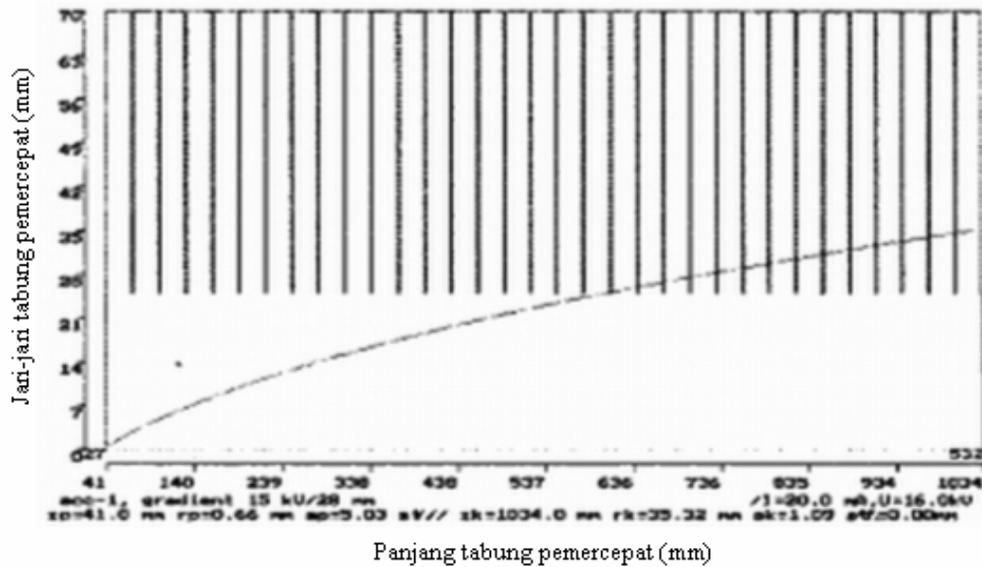


Gambar 4. Lintasan elektron dengan melibatkan pengaruh *self-field* dan $U_1 = 27,7$ kV.

Pada Gambar 3 dan 4 diberikan hasil simulasi lintasan berkas elektron yang masing-masing melibatkan perhitungan dari pengaruh medan magnet sendiri (*self-field*) dan pada harga potensial medan U_1 yang berbeda. Jari-jari berkas elektron setelah melewati tabung pemercepat, r_p , adalah masing-masing 2,07 mm dan 3,03 mm dengan harga r_k masing-masing adalah 1,75 mm dan

2,61 mm, dan sudut divergensi masing-masing adalah 0,04 derajat dan 0,02 derajat. Hal tersebut menyatakan dengan diberikan tegangan pemercepat yang lebih besar didapatkan penyebaran berkas elektron yang relatif kecil.

Jari-jari berkas elektron setelah melewati tabung pemercepat adalah 33,32 mm dan sudut divergensinya adalah 1,00 derajat.



Gambar 5. Lintasan elektron tanpa melibatkan pengaruh *self-field* dan $U = 16,0$ kV.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi diperoleh kesimpulan bahwa gaya magnet dan gaya dari muatan ruang mempunyai vektor arah yang saling berlawanan dan saling menghilangkan bergantung kecepatan aliran berkas elektron sebagai fungsi $k(v) = (1 - \beta^2) / \beta$, dengan $\beta = v/c$. Untuk harga-harga β kecil ($\beta \rightarrow 0$), gaya dari muatan ruang lebih dominan dan pada harga-harga β besar ($\beta \rightarrow 1$), gaya magnet hampir mengeliminasi secara total gaya dari muatan ruang.

Dari data-data simulasi dapat disimpulkan bahwa dengan diberikan harga potensial medan U yang berbeda dihasilkan diameter berkas elektron yang berbeda. Lebih lanjut, apabila medan magnet internal diabaikan (tanpa melibatkan pengaruh *self-field* pada arus berkas elektron) maka didapat diameter berkas elektron yang lebih besar dan sudut divergensinya juga lebih besar. Dari hasil simulasi didapat fenomena bahwa penyebaran berkas elektron pada sistem pemercepat tidak linear terhadap kenaikan tegangan yang diberikan pada sistem pemercepat.

Dengan hasil-hasil simulasi tersebut memungkinkan untuk memilih elektroda untuk sistem pemercepat yang lebih sesuai dan mendapatkan cara-cara untuk pemanduan berkas elektron yang lebih sesuai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.B. CAMBEL, *Plasma Physics and Magneto-fluidmechanics*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1963.

- [2] H. ALFEN, *Cosmic Plasma*, D. Reidel Publication Company, London, 1981.
- [3] A. HOFFMAN, *Classical Electrodynamics*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1998.
- [4] G.R. BREWER, *Focusing of Hig Density Electron Beams*, in *Focusing of Charged Particles*, vol II, Academic Press, London 1967.
- [5] A. GALEJS, P.H. ROSE, *Optics of Electrostatic Accelerator Tubes*, in *Focusing of Charged Particles*, vol II, Academic Press, London, 1967.
- [6] C. WEBER, *Numerical Solution of Lapace and Poisson Equations and the Calculation of Electron Trajectories and Electron Beams*, in *Focusing of Charged Particles*, vol II, Academic Press, London, 1967.

TANYA JAWAB

Budi Santosa

- Apakah didalam software yang digunakan sudah memperlihatkan efek relativistik?

Slamet Santosa

- Pada simulator yang digunakan sudah melibatkan persamaan-persamaan relativistik. Penyelesaiannya menggunakan metode Runge-Kutta (ref. no. 5).

