

DESAIN AWAL SISTEM KENDALI PARAMETER BERKAS RADIASI MESIN BERKAS ELEKTRON 350 keV/10 mA PTAPB – BATAN YOGYAKARTA

SUTANTO

*Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir
Badan Tenaga Nuklir Nasional - BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 YKBB, Yogyakarta 55281
E-mail: sutanto@sttn-batan.ac.id*

Abstrak

DESAIN AWAL SISTEM KENDALI PARAMETER BERKAS RADIASI MESIN BERKAS ELEKTRON 350 keV/10 mA PTAPB – BATAN YOGYAKARTA. Desain awal sistem kendali parameter berkas radiasi Mesin Berkas Elektron (MBE) 350 keV/10 mA memiliki tujuan mendapatkan algoritma kendali MBE di PTAPB-BATAN Yogyakarta. Desain sistem kendali didasarkan pada model parameter berkas MBE. Model tersebut menunjukkan ada keterkaitan antara pengaturan parameter dosis radiasi dengan pengaturan energi berkas, yang mana hal itu menjadi masalah dalam pengaturan parameter berkas radiasi. Algoritma kendali diperoleh dengan menentukan persamaan-persamaan kompensator dari model parameter berkas. Persamaan-persamaan tersebut akan menghilangkan korelasi antara parameter dosis radiasi dan parameter energi berkas, sehingga parameter berkas dapat diatur dengan mudah. Hasil pengujian algoritma sistem kendali berdasarkan simulasi menunjukkan bahwa penentuan besar parameter berkas radiasi dapat dilakukan dengan memberikan nilai arus filamen dan tegangan pemercepat yang diharapkan. Besar dosis radiasi dan energi berkas akan diatur secara otomatis sesuai dengan fungsi nilai arus filamen dan tegangan pemercepat.

Kata kunci : parameter berkas, sistem kendali, persamaan kompensator

Abstract

PRE DESIGN OF BEAM PARAMETER CONTROL SYSTEM FOR ELECTRON BEAM MACHINE (EBM) 350 keV/10 mA IN THE CENTER FOR ACCELERATOR AND MATERIAL PROCESS TECHNOLOGY (PUSAT TEKNOLOGI DAN PROSES BAHAN/PTAPB) – BATAN YOGYAKARTA. Pre design of beam parameter control system for Electron Beam Machine (EBM) 350 keV/10 mA had an objective to find a control system algorithm for EBM in The Center For Accelerator and Material Process Technology (Pusat Teknologi dan Proses Bahan/PTAPB) – BATAN Yogyakarta. The design was based on the beam parameter model of EBM. The model shown a relationship between the dose parameter setting and the beam energy setting which it was being a problem in setting the beam parameters. The control system algorithm was found by getting compensator equations from the beam parameter model of EBM. The equations would omit the

relation between the radiation dose parameter and beam energy parameter, so that the parameters could be adjusted easily. The result of the control system algorithm examine based on simulation shown that the setting of beam parameter value could be done by giving the accelerating voltage value and the filament current value as the operator had determined the value. The value of radiation dose and beam energy would be adjusted as its function of the filament current value and the accelerating voltage value.

Keywords : beam parameter, control system, compensator equations

PENDAHULUAN

Mesin Berkas Elektron (MBE) merupakan teknologi nuklir yang dapat dimanfaatkan untuk proses bahan sehingga bahan tersebut memiliki sifat yang lebih baik. Proses bahan yang dilakukan dalam industri misalnya vulkanisasi karet ban, perbaikan sifat kabel listrik, polimerisasi, pengolahan limbah padat dan cair, dan *flue gas treatment*^[1]. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB)-BATAN Yogyakarta sudah membuat mesin berkas elektron (MBE) dengan spesifikasi 350 keV/10 mA. Pembuatan mesin tersebut bertujuan untuk penelitian terkait dengan aplikasi MBE dan meningkatkan SDM terkait dengan teknologi MBE. Sampai saat ini, mesin tersebut masih dikembangkan untuk mendapatkan unjuk kerja yang lebih baik.

Dalam proses bahan menggunakan radiasi elektron, ada tiga parameter utama yang harus diperhatikan, yaitu radiasi berkas elektron, bahan yang diradiasi (target), dan teknik iradiasi^[2]. Parameter radiasi berkas elektron meliputi dosis radiasi dan energi berkas elektron. Kemudahan pengaturan dosis radiasi dan energi berkas elektron merupakan salah satu ukuran kualitas unjuk kerja MBE. Dalam operasinya, dosis radiasi ditentukan dengan mengatur variabel arus filamen, sedangkan energi berkas ditentukan dengan mengatur variabel tegangan pemercepat. Kedua variabel arus filamen dan tegangan pemercepat memiliki keterkaitan (relasi), sehingga pengaturan kedua parameter dosis radiasi dan energi berkas sulit dilakukan.

Hubungan antara variabel arus filamen, tegangan anode, dan tegangan pemercepat sudah dinyatakan dalam persamaan model parameter berkas MBE^[3]. Model parameter berkas MBE tersebut dapat digunakan sebagai dasar untuk desain sistem kendali MBE sehingga penentuan parameter dosis dan energi berkas bisa dilakukan dengan mudah. Prinsip desain kendali berdasarkan model tersebut adalah dengan menentukan persamaan baru (persamaan kompensator) yang berfungsi untuk menghilangkan hubungan antara parameter dosis radiasi dan energi berkas, sehingga masing-masing

parameter dapat ditentukan dengan mudah tanpa dipengaruhi oleh perubahan parameter yang lain.

DASAR TEORI

Mesin Berkas Elektron

Mesin Berkas Elektron terdiri atas beberapa sistem utama, yaitu: sumber elektron; tabung pemercepat; sumber tegangan tinggi; dan sistem optic^[2].

a. Sumber Elektron

Pada sumber elektron, proses dihasilkannya elektron bisa melalui pemanasan suatu katode (kawat tungsten). Proses ini disebut emisi termionik. Pada emisi termionik, elektron terlepas dari bahan yang mempunyai fungsi kerja kecil. Pelepasan ini akan diperkuat oleh adanya medan listrik di antara anode dan katode. Formulasi antara arus maksimum pelepasan elektron dengan suhu T ditunjukkan oleh formula Richardson/Dushman yang dinyatakan dalam Persamaan (1).

$$I_e = SAT^2 e^{-11600 E_w/T} \quad (1)$$

I_e merupakan arus elektron teremisi, S merupakan luas permukaan katode, A merupakan tetapan khas bahan, T merupakan suhu katode dalam kelvin, dan E_w merupakan fungsi kerja bahan katode dalam elektron-volt. Setelah pemanasan, elektron tidak serta merta menjauh dari permukaan katode. Penarikan elektron dari permukaan katode dilakukan dengan memberikan potensial V . Formulasi rapat arus elektron J akibat potensial V dinyatakan oleh Persamaan Child Langmuir, ditunjukkan oleh Persamaan (2).

$$J = P \cdot V^{3/2} \quad (2)$$

P merupakan konstanta sebagai fungsi geometri sistem, yang disebut perviansi.

b. Sumber Tegangan Tinggi

Sumber tegangan tinggi dipasang pada tabung pemercepat untuk menghasilkan medan listrik (medan pemercepat). Salah satu tipe sumber tegangan tinggi adalah tipe Cockroff-Walton. Sumber tegangan tinggi tipe Cockroff-Walton terdiri dari dua bagian utama, yaitu osilator daya dan pelipat tegangan. Osilator daya tersusun atas komponen utama triode dan transformator frekuensi tinggi. Osilator daya berfungsi untuk menghasilkan tegangan berosilasi dengan daya dan frekuensi tinggi.

Masukan osilator berupa tegangan anode. Tegangan anode dibangkitkan oleh variac dan penyearah. Variac diatur oleh perputaran motor DC. Besar tegangan anode sebagai fungsi posisi motor berupa persamaan linear yang ditunjukkan oleh Persamaan (3).

$$V_A = m\theta + c \quad (3)$$

dengan V_A adalah tegangan anode, m adalah gradien garis, θ adalah posisi sudut variac, dan c adalah konstanta garis.

Tegangan keluaran osilator kemudian dilipatkan dan disearahkan oleh pelipat tegangan sehingga dihasilkan tegangan tinggi DC. Proses pelipatan tegangan mengikuti Persamaan (4).

$$V_{o\max} \cong 2nV_{in\max} - \frac{I}{fC} \times \frac{2n^3}{3} \quad (4)$$

dengan $V_{o\max}$ adalah tegangan tinggi DC, I adalah arus beban, n adalah jumlah tingkat pelipat tegangan, f adalah frekuensi osilasi tegangan masukan, C adalah kapasitansi kapasitor pelipat tegangan, dan $V_{in\max}$ adalah amplitude tegangan masukan.

c. Tabung Pemercepat

Tabung pemercepat merupakan ruang vakum (tekanan udara cukup kecil) di mana pada bagian dinding tabung tersusun atas elektrode-elektrode. Jika pada elektrode-elektrode tersebut dipasang tegangan tinggi maka akan dibangkitkan medan listrik dengan ujung yang satu bersifat positif, dan ujung yang lain bersifat negatif. Saat ada berkas elektron pada bagian negatif, maka berkas tersebut akan dipercepat menuju ujung yang positif. Dalam perjalanannya, arah berkas elektron diatur oleh sistem optik, yaitu berupa medan magnet. Sistem optik mengarahkan berkas elektron menuju window, kemudian keluar mengenai material target. Sifat material akan berubah sesuai dengan besar dosis dan energi berkas elektron. Jumlah elektron (dosis) dan energi gerak elektron tergantung pada besar arus filamen dan tegangan pemercepat yang dipasang pada tabung pemercepat.

Model Parameter Berkas MBE

Model statik parameter berkas MBE dinyatakan dalam Persamaan (5)^[3].

$$V_p = \frac{\left(\frac{V_A}{c} \log \left\{ 1 + \exp \left[c \left(\frac{1}{d} - \frac{I_f}{V_A} \right) \right] \right\} \right)^b}{a} \quad (5)$$

dengan V_p adalah tegangan pemercepat (tegangan tinggi DC), V_A adalah tegangan anode, I_f adalah arus filament, dan a, b, c, d adalah parameter-parameter model. Identifikasi sistem MBE di PTAPB-BATAN mendapatkan nilai parameter-parameter model:

$$a = 0,0005$$

$$b = 1,2$$

$$c = 4768,6$$

$$d = 39,7$$

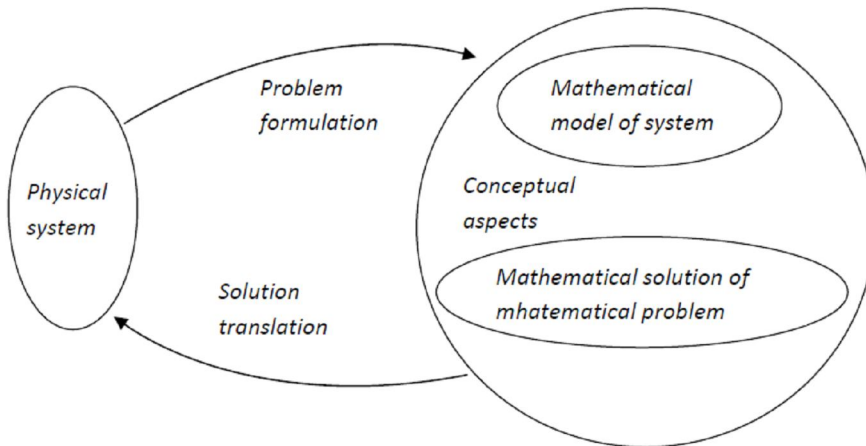
Model dalam Persamaan (4) menunjukkan hubungan antara variabel tegangan anode pada osilator daya (V_A), arus filamen pada sumber elektron (I_f) dan tegangan pemercepat/tegangan tinggi DC (V_p). Variabel arus filamen akan membangkitkan arus berkas elektron. Besar arus berkas elektron berkaitan dengan besar dosis radiasi. Arus berkas elektron merupakan bagian dari arus beban sumber tegangan tinggi, sesuai dengan Persamaan (6).

$$I_{beban} = I_{STT} + I_{berkas} + I_{korona} \quad (6)$$

dengan I_{beban} adalah arus total beban sumber tegangan tinggi, I_{STT} adalah arus sumber tegangan tinggi dari pelipat tegangan, I_{berkas} adalah arus berkas elektron, dan I_{korona} adalah arus bocor yang mengalir di antara elektrode pemercepat. Persamaan (4) dan (5) menunjukkan bahwa variabel arus filamen mempengaruhi variabel tegangan pemercepat (tegangan tinggi DC).

Desain Sistem Kendali

Prinsip desain sistem kendali ditunjukkan oleh Gambar 1^[4]. Prinsip desain kendali meliputi pemodelan sistem yang hendak dikendalikan. Model dapat dinyatakan dalam bentuk rumusan matematika. Model sistem digunakan sebagai ekspresi sistem yang memiliki permasalahan. Permasalahan model sistem diselesaikan dengan merumuskan permasalahan matematika. Solusi tersebut kemudian diimplementasikan ke sistem fisik sehingga diharapkan sistem bekerja seperti dengan yang diharapkan. Jika unjuk kerja sistem belum memenuhi ketentuan yang diinginkan, maka prosedur desain kendali dilakukan lagi sampai unjuk kerja sistem memenuhi ketentuan yang ditetapkan^[5].



Gambar 1. Prinsip Desain Kendali

METODOLOGI PENELITIAN

Alat dan Bahan

Voltmeter, busur derajat, *stopwatch*, sistem sumber tegangan tinggi tipe Cockcrof-Walton, Mesin Berkas Elektron.

Tahap-Tahap Desain Sistem Kendali

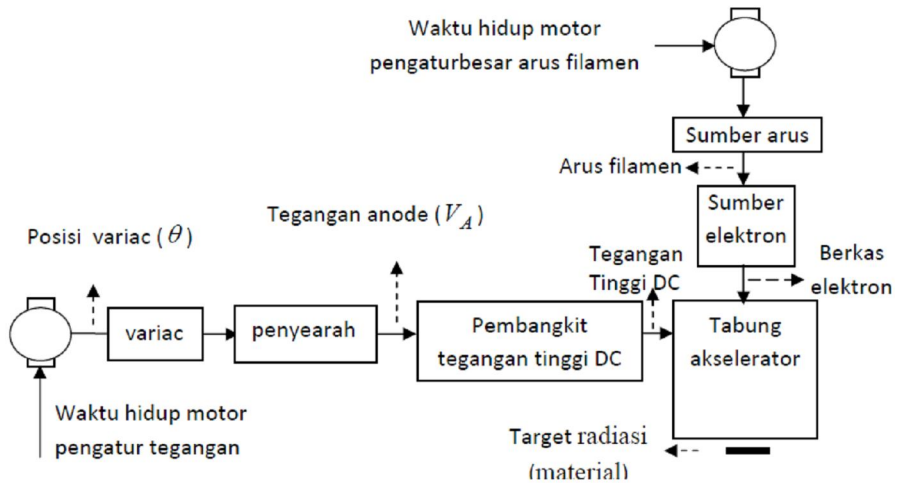
Titik-titik ukur pengukuran data ditunjukkan pada Gambar 2.

- Mengukur besar tegangan anode sebagai fungsi posisi variac. Tegangan anode dibangkitkan oleh rangkaian penyearah dengan masukan posisi variac. Jangkauan tegangan anode adalah dari 0 volt sampai dengan 2500 volt untuk jangkauan posisi variac dari 0° sampai dengan 360° .
- Mengukur kecepatan putar motor pada tegangan motor DC 6 volt. Posisi variac diatur oleh gerakan motor DC. Pada kecepatan motor DC tetap, posisi variac merupakan fungsi waktu hidup motor DC.
- Analisis model parameter berkas MBE. Berdasarkan pada penelitian sebelumnya diperoleh bahwa model parameter berkas MBE ditunjukkan oleh Persamaan (6) dan (7).

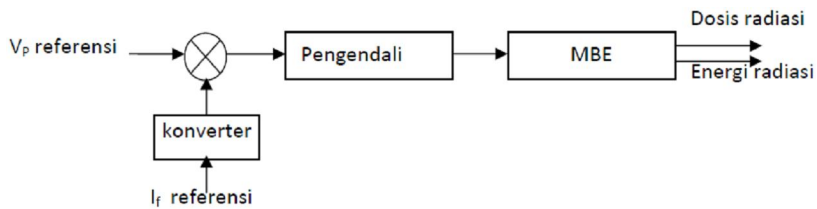
$$\hat{V}_p = \frac{\left(\frac{V_A}{4768,6} \log \left\{ 1 + \exp \left[4768,6 \left(\frac{1}{39,7} - \frac{I_{L_model}}{V_A} \right) \right] \right\} \right)^{1,2}}{0,0005} \quad (6)$$

$$I_{f_model} = 0.006414 \left(e^{0.5769 \hat{I}_f} - 1 \right) \tag{7}$$

Desain sistem kendali parameter berkas MBE. Diagram blok pengendali parameter berkas MBE ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 2. Titik-Titik Ukur Data Desain Sistem Kendali Parameter Berkas MBE



Gambar 3. Diagram Blok Pengendali Parameter Berkas MBE

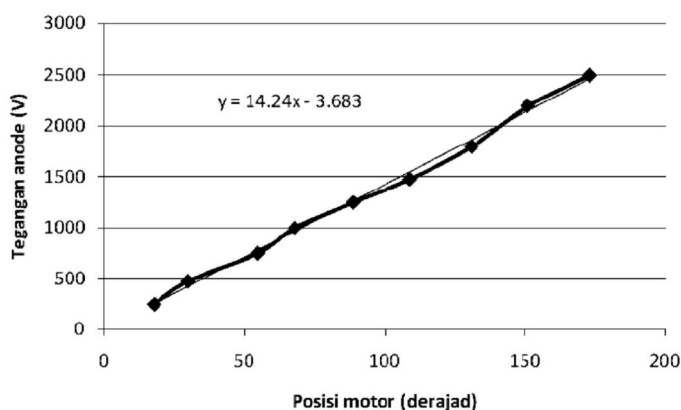
HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil pengukuran ditunjukkan oleh Tabel 1 dan Tabel 2. Dalam bentuk kurve, tegangan anode sebagai fungsi posisi variac ditunjukkan oleh Gambar 4. Gambar 4 menunjukkan kurve persamaan tegangan anode sebagai fungsi posisi motor dalam Persamaan (8).

$$V_A = 14,20 - 3,7 \tag{8}$$

Tabel 1. Tegangan Anode (V_A) sebagai Fungsi Posisi Motor (θ)

No	θ ($^\circ$)	V_A (V)
1	18	250
2	30	475
3	55	750
4	68	1000
5	89	1250
6	109	1480
7	131	1800
8	151	2200
9	173	2500



Gambar 4. Kurve Tegangan Anode Sebagai Fungsi Posisi Motor

Tabel 2. Waktu Hidup Motor (Tegangan Motor 6 V)

No.	θ ($^\circ$)	t (detik)
1.	90	2,85
2.	90	2,36
3.	90	2,17
Waktu rata-rata		2,46

Pada tegangan motor 6 volt, waktu tempuh rata-rata adalah 2,46 detik untuk jarak tempuh 90° . Kecepatan putar motor dapat dihitung sebagai berikut:

$$\omega = 90^\circ / 2,46 \text{ detik} = 36,59 \text{ derajat/detik}$$

Dengan demikian Persamaan (8) menjadi Persamaan (9)

$$V_A = 14,2\omega t - 3,7$$

$$V_A = 14,2 \times 36,59 t - 3,7$$

$$V_A = 519,58 t - 3,7 \tag{9}$$

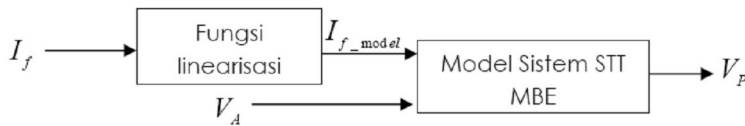
Jika dinyatakan waktu (t) sebagai fungsi tegangan anode, maka:

$$t = \frac{V_A}{519,58} + \frac{3,7}{519,58}$$

$$\frac{dt}{dV_A} = \frac{1}{519,58} \tag{10}$$

Analisis Model Parameter Berkas MBE

Diagram blok model parameter berkas dapat dinyatakan seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Blok Model Parameter Berkas MBE

Persamaan model tersebut ditunjukkan dalam Persamaan (6) dan (7). Persamaan (6) dan (7) menunjukkan hubungan antara 3 variabel, yaitu variabel tegangan anode, variabel arus filamen model, dan variabel tegangan pemercepat. Berdasarkan Persamaan (6) dan (7), persamaan kompesator diperoleh sebagai berikut:

$$\hat{V}_P = \frac{\left(\frac{V_A}{4768,6} \log \left(1 + e^{(4768,6(1/39,7 - I_{f_model}/V_A))} \right) \right)^{1,2}}{0,0005}$$

$$0,0005 \hat{V}_P = \left(\frac{V_A}{4768,6} \log \left(1 + e^{(4768,6(1/39,7 - I_{f_model}/V_A))} \right) \right)^{1,2}$$

$$0,0005 \hat{V}_P = \frac{V_A^{1,2}}{25945,9} \left(\log \left(1 + e^{(4768,6(1/39,7 - I_{f_model}/V_A))} \right) \right)^{1,2}$$

$$12,97 \hat{V}_P = V_A^{6/5} \left(\log \left(1 + e^{(4768,6(1/39,7 - I_{f_model}/V_A))} \right) \right)^{6/5}$$

$$\left(\sqrt[5]{(12,97 \hat{V}_P)^5} \right) = V_A \log \left(1 + e^{(4768,6(1/39,7 - I_{f_model}/V_A))} \right)$$

$$\left(\sqrt[5]{(12,97 \hat{V}_P)^5} \right) V_A^{-1} = \log \left(1 + e^{(4768,6(1/39,7 - I_{f_model}/V_A))} \right)$$

$$e^{\left(\sqrt[5]{(12,97 \hat{V}_P)^5} \right) V_A^{-1}} = 1 + e^{(4768,6(1/39,7 - I_{f_model}/V_A))}$$

Jika angka 1 diabaikan maka:

$$\left(\sqrt[5]{(12,97 \hat{V}_P)^5} \right) V_A^{-1} = 4768,6(1/39,7 - I_{f_model}/V_A)$$

$$\left(\sqrt[5]{(12,97 \hat{V}_P)^5} \right) V_A^{-1} = 120 - \frac{4768,6 I_{f_model}}{V_A}$$

$$\left(\sqrt[5]{(12,97 \hat{V}_P)^5} \right) = 120 V_A - 4768,6 I_{f_model}$$

$$\left(\sqrt[5]{(12,97 \hat{V}_P)^5} \right) + 4768,6 I_{f_model} = 120 V_A$$

$$V_A = 39,7 I_{f_model} + \frac{\left(\sqrt[5]{(12,97 \hat{V}_P)^5} \right)}{120}$$

$$V_A = 39,75 I_{f_model} + \frac{(12,97 \hat{V}_P)^{5/6}}{120} \quad (11)$$

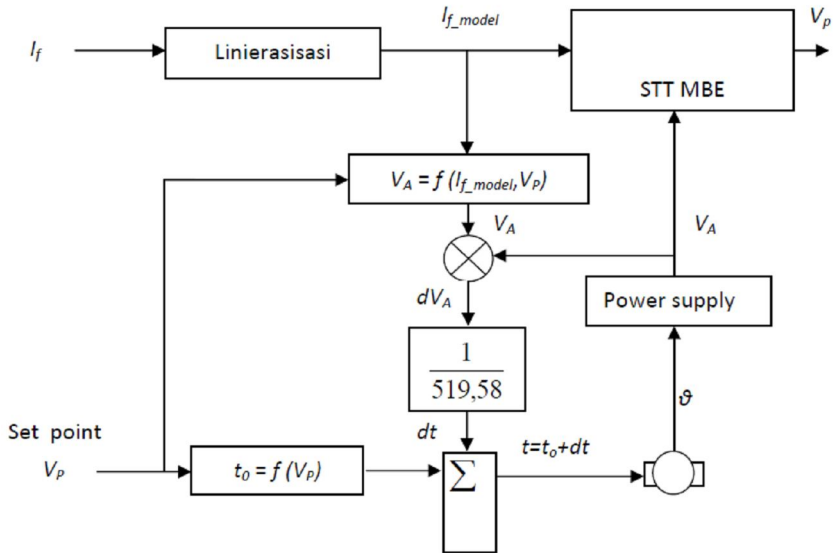
Persamaan (11) merupakan persamaan kompensator. Jika Persamaan (9) disubstitusikan ke Persamaan (11) maka diperoleh:

$$519,58t - 3,7 = 39,75 I_{f_model} + \frac{(12,97 \hat{V}_P)^{5/6}}{120}$$

$$t = \frac{9,75 I_{f_model} + \frac{(12,97 \hat{V}_P)^{5/6}}{120} + 37}{519,58} \quad (12)$$

Pada saat *start up* MBE, nilai arus filamen adalah nol, maka Persamaan (12) dapat dinyatakan dalam Persamaan (13).

$$t_o = \frac{(12,97 \hat{V}_p)^{5/6}}{519,58} + 37 \tag{13}$$



Gambar 6. Diagram Blok Sistem Kendali Parameter Berkas MBE PTAPB-BATAN

Dari Persamaan (6) dan (7), Persamaan (10), Persamaan (11), dan Persamaan (13), dapat didesain suatu sistem kendali, yang ditunjukkan oleh Gambar 6.

Pada *start up* awal sistem STT MBE, tegangan pemercepat V_p ditentukan pada nilai tertentu sesuai dengan permintaan energi berkas elektron. Pengaturan ini dilakukan pada kondisi arus filamen bernilai nol. Selanjutnya arus berkas diatur dengan menaikkan arus filamen sesuai dengan permintaan dosis radiasi. Pada pengoperasian ini diharapkan tegangan pemercepat tidak berubah akibat dari perubahan arus filamen. Untuk mengetahui unjuk kerja sistem pada Gambar 5, dilakukan pengujian operasi untuk nilai yang diharapkan $V_p = 300\ 000$ volt dan $I_f = 10$ A, langkah-langkah operasi sistem kendali adalah sebagai berikut:

1. Pada saat $I_f = 0$, dengan menggunakan Persamaan (13) diperoleh nilai waktu hidup motor awal t_o sebagai berikut:

$$t_o = \frac{(12,97 \times 300000)^{5/6}}{519,58} + 3,7 = 4,9832 \text{ detik}$$

2. Tegangan anode yang dibangkitkan dihitung dengan menggunakan Persamaan (9).

$$V_A = 519,58(5) - 3,7 = 2585,5 \text{ volt}$$

3. Tegangan anode ini membangkitkan tegangan pemercepat sesuai dengan Persamaan (6).

$$\hat{V}_p = \frac{\left(\frac{2594}{4768,6} \log \left\{ 1 + \exp \left[4768,6 \left(\frac{1}{39,7} - \frac{0}{2594} \right) \right] \right\} \right)^{1,2}}{0,0005}$$

$$= 300280 \text{ volt}$$

4. Saat arus filamen dinaikkan menjadi 10 A, maka V_A baru yang diperlukan dihitung dengan menggunakan Persamaan (7) dan (11).

$$I_{f_model} = 0.006414 \left(e^{0.5769 \times 10} - 1 \right) = 2.05475A$$

$$V_A \text{ (baru)} = 39,75 \times 2,05 + \frac{(12,97 \times 300000)^{5/6}}{120} = 2666,8 \text{ volt}$$

5. Perubahan tegangan anode yang harus dilakukan adalah

$$\Delta V = 2666,8 \text{ volt} - 2594 \text{ volt} = 81,4 \text{ volt}$$

6. Maka motor harus dihidupkan lagi selama waktu sesuai dengan persamaan

$$dt = \frac{1}{519,58} dV_A = \frac{72.84}{519,58} = 0.1566 \text{ detik}$$

7. Waktu total hidup motor menjadi

$$t = 5 \text{ detik} + 0,1566 \text{ detik} = 5,1566 \text{ detik}$$

8. Tegangan anode dihitung dengan Persamaan (9)

$$V_A = 519,58(5,14) - 3,7 = 2666,8 \text{ volt}$$

Dengan demikian, saat ada perubahan arus filamen dari 0 A menjadi 10 A, tegangan pemercepat menjadi:

$$\hat{V}_p = \frac{\left(\frac{2666,9}{4768,6} \log \left\{ 1 + \exp \left[4768,6 \left(\frac{1}{39,7} - \frac{2,05475}{2666,8} \right) \right] \right\} \right)^{1,2}}{0,0005}$$

= 300290 volt

Penurunan tegangan = 300000 volt – 300290 volt = 290 volt

Jika tanpa sistem kendali, maka:

$$\hat{V}_p = \frac{\left(\frac{2594}{4768,6} \log \left\{ 1 + \exp \left[4768,6 \left(\frac{1}{39,7} - \frac{2,05475}{2666,9} \right) \right] \right\} \right)^{1,2}}{0,0005}$$

= 288990 volt

Penurunan tegangan = 300000 volt – 288990 volt = 11010 volt

Perubahan tegangan pemercepat pada sistem STT MBE dengan pengendali jauh lebih kecil dari perubahan tegangan pemercepat tanpa pengendali. Tabel 3 menunjukkan data pengujian untuk setting point tegangan pemercepat dan arus filamen yang lain.

Tabel 3. Data Pengujian Desain Kendali Berdasarkan Perhitungan

No	Arus filamen (A)	V_{Ao} (V)	V_{Po} (V)	V_p -tanpa kendali (V)	V_{AI_f} (V)	V_p -dengan kendali (V)
1	11,10	1689,1	180170	160 700	1842,9	180 190
2	12,10	1689,1	180170	145 740	1963,1	180 210
3	12,75	1689,1	180170	130 490	2087,8	180 230
4	13,60	1689,1	180170	100 530	2340,3	180 270

Keterangan:

V_{Ao} : Tegangan anode saat arus filamen 0 A

V_{Po} : Tegangan pemercepat saat arus filamen 0 A

V_{AI_f} : Tegangan anode saat ada arus filamen

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan algoritma sistem kendali dapat menghilangkan relasi antara parameter dosis radiasi dengan energi berkas radiasi. Adanya relasi antara kedua parameter menjadi masalah dalam mengatur besar parameter berkas radiasi.

2. Dekorelasi antara parameter dosis radiasi dengan parameter energi berkas ditunjukkan oleh hilangnya pengaruh perubahan arus filament terhadap besar tegangan pemercepat.

SARAN

Algoritma sistem kendali dapat diimplementasikan ke dalam perangkat digital seperti mikrokontroler sehingga dapat dipasang ke sistem MBE di PTAPB-BATAN Yogyakarta.

DAFTAR PUSTAKA

1. DANU, S., 2004, "Aplikasi Mesin Berkas Elektron Dalam Bidang Polimer Industri", Diktat Materi Kuliah BATAN Accelerator School 2004, BATAN.
2. SUPRAPTO, dkk, 1999, "Perancangan Sumber Tegangan Tinggi 500 kV/200 mA Sebagai Tegangan Pemercepat Pada Mesin Berkas Elektron", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, BATAN.
3. SUTANTO, 2009, "Pemodelan Sumber Tegangan Tinggi Mesin Berkas Elektron 350 keV/10 mA", Tesis, UGM.
4. PHILLIPS C. L., Harbor R. D., 1996, Feedback Control System, Prentice Hall International, Inc.
5. LANDAU I. D., 1990, System Identification And Control Design, Prentice-Hall International Edition.
6. DARWIS D., 2004, "Aplikasi Mesin Berkas Elektron Dalam Bidang Biomedical"
7. Polymers dan Farmasi", Diktat Materi Kuliah BATAN Accelerator School 2004, BATAN.
8. DEWANTO., 2000, "Pemodelan Sistem Pengatur Ketinggian Air Pada Sebuah Tangki Tunggal", Jurnal Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra.
9. DJASIMAN, dkk, 1999, "Perancangan Osilator Daya Untuk Sumber Tegangan Tinggi Tipe Cockroft-Walton 500 kV/20 mA".
10. HELLBORG R., 2005, "Electrostatic Accelerators, Fundamental and Applications", Springer.
11. KUFFEL E., 2000, "High Voltage Engineering, Fundamentals", Butterworth-Heinemann.
12. SETIAWAN, 1998, "Instrumentasi Dan Kendali, Pengenalan Dan Aplikasi Akselerator", Pusdiklat, BATAN.