

PENINGKATAN UNJUK KERJA SISTEM PEMFOKUS MBE 350 keV/10 mA

Saminto, Tono Wibowo, Subari Santoso

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju

ABSTRAK

PENINGKATAN UNJUK SISTEM PEMFOKUS MBE 350 keV/10 mA. Telah dilakukan peningkatan unjuk kerja sistem pemfokus MBE 350 keV/10 mA dengan menambahkan suatu rangkaian protektor pada catu daya sistem pemfokus. Fungsi rangkaian protektor ini adalah untuk melindungi komponen MBE lainnya dari kerusakan akibat kegagalan operasi sistem pemfokus. Sistem pemfokus adalah komponen MBE yang berfungsi untuk memfokuskan berkas elektron. Tanpa pemfokus berkas elektron akan menyebar dan menabrak dinding tabung pemercepat dan corong pelayar dan mengakibatkan kerusakan. Oleh sebab itu sistem pemfokus harus benar-benar baik dan handal. Hasil percobaan menunjukkan bahwa rangkaian protektor bekerja baik yaitu, mengaktifkan relay magnetik dan merubah status keluaran interlok pada arus 1A. Keluaran arus pemfokus 1A adalah aman untuk operasi MBE. Waktu tanggap dari rangkaian protektor terukur sebesar 20 milidetik. Sedangkan angka keandalan sistem pemfokus sebesar $R = 0,999$ atau 99,9%. Disajikan pula hasil uji ketahanan sistem pemfokus berkas elektron pada MBE.

Kata kunci: sistem pemfokus, keselamatan

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF THE PERFORMANCE OF FOCUSING SYSTEM FOR EBM 350 keV/10mA. The power supply of focusing system has been improved by adding a protector circuit. The function of the protector circuit is to protect EBM components damage due to failure of focusing system operation. The focusing system is a component of EBM for focusing electron beam. Without focusing system, the electron beam will diverge and hit on accelerator tube and scanning horn of EBM. Therefore, the focusing system must properly good and reliable. The experiment result showed that the protector is running well, i.e. activates the magnetic relay and switches the interlock status at the output current of 1A. This output current is safe for operation of EBM. The measured respon time of the protector circuit was 20 ms. While the reliability value of the focusing system was $R = 99,9\%$. The result of the endurance test of electron beam focusing system of EBM is also presented in this paper.

Key word: focusing system, safety

PENDAHULUAN

Sistem pemfokus adalah satu diantara komponen utama akselerator elektron. Sistem pemfokus ini berfungsi untuk memfokuskan berkas elektron setelah melewati sistem pemercepat. Sistem pemfokus berkas elektron dapat dibuat dengan menggunakan medan listrik atau medan magnet^[1].

Mesin Berkas Elektron dengan energi 350 keV, arus 10 mA yang telah dibuat di P3TM menggunakan medan magnet selenoid sebagai sistem pemfokusan. Elektron yang bergerak didalam medan magnet mengalami gaya Lorentz sehingga akan merubah arah gerak elektron tetapi tidak merubah energi elektron^[2].

Pada saat elektron masuk ke ujung lensa selenoid, maka lintasan elektron melewati daerah dimana arah medan magnetnya adalah radial (B_r). Untuk elektron yang tidak sejajar sumbu, maka terdapat komponen kecepatan aksial dan radial. Sehingga perkalian vektor kecepatan aksial dan medan magnet radial menghasilkan gaya Lorentz azimutal yang mengakibatkan elektron bergerak memutar sambil maju (elektron mempunyai kecepatan sudut/angular). Perkalian vektor kecepatan angular dengan medan magnet aksial menghasilkan gaya Lorentz radial yang mengakibatkan elektron terdefleksi kearah sumbu selenoid. Gerak elektron dalam selenoid menjadi berbentuk spiral dan makin mendekati sumbu selenoid (terfokus)^[2]. Apabila terjadi kegagalan operasi sistem pemfokus maka berkas akan menyebar dan membentur dinding

corong pemayar yang mengakibatkan kerusakan pada komponen MBE. Karena pentingnya sistem pemfokus terhadap keselamatan komponen MBE, maka dalam tulisan ini dikemukakan mengenai usaha penyempurnaan sistem pemfokusan, yaitu dengan menambahkan rangkaian *protector* pada catu daya yang telah dibuat sebelumnya. Rangkaian *protector* berfungsi untuk melindungi komponen MBE dari kerusakan akibat dari kegagalan operasi, diharapkan apabila suatu saat sistem pemfokus gagal, rangkaian *protector* akan bereaksi memberikan perubahan status interlok.

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem pemfokus berkas elektron yang telah disempurnakan terdiri tiga bagian utama, yaitu bagian selenoid, regulator arus dan rangkaian *protector*.

Selenoid

Landasan teori rancang bangun lensa magnetik selenoid untuk pemfokus berkas elektron adalah interaksi yang terjadi apabila elektron bergerak melalui medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan berarus listrik. Garis-garis medan magnet yang dihasilkan oleh suatu selenoid panjang

merupakan lintasan tertutup melingkupi selenoid, sehingga untuk bagian tengah selenoid garis-garis medan magnet tersebut sejajar dengan sumbu selenoid. Dapat dikatakan medan magnet hanya mempunyai komponen arah aksial, sedangkan untuk arah bagian pinggir selenoid, garis-garis medan magnet berbentuk lengkung, tampak pada Gambar 1^[2].

Untuk suatu selenoid dengan jumlah lilitan N dan arus kumparan I , maka medan magnet aksial didalam selenoid adalah^[3]

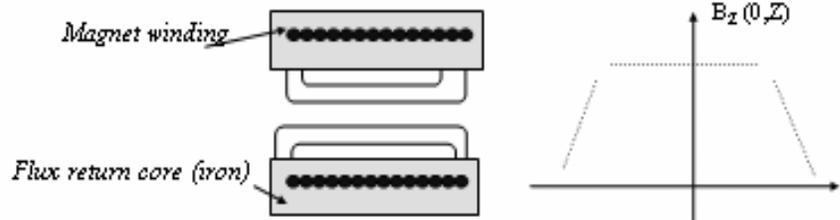
$$B_z = \frac{\mu_0 N I}{L} \quad (1)$$

dengan μ_0 adalah permeabilitas udara.

Selanjutnya dengan penurunan persamaan lebih lanjut diperoleh jarak fokus (f)^[3]:

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

dengan μ_0 = permeabilitas udara (kgm/C), m = massa elektron (kgm), E = Energi gerak elektron (eV), L = lebar celah pembungkus elektromagnet (m), e = muatan elektron (Coulomb), N = jumlah lilitan, I = kuat arus (Ampere).



Gambar 1. Selenoid, garis-garis medan magnet dan distribusi medan magnet yang ditimbulkannya^[2].

Keandalan (Reliabilitas)

Reliabilitas adalah kemampuan suatu barang melaksanakan fungsi yang dibutuhkan (tanpa kegagalan) dalam kondisi tertentu selama periode waktu tertentu. Barang yang dimaksudkan disini adalah suatu komponen, instrumen atau sistem. Karena keandalan bersangkutan dengan kegagalan, maka perlu diketahui definisi kegagalan. Kegagalan adalah berakhirnya kemampuan suatu barang melaksanakan fungsi yang dibutuhkan.

Penelitian tentang reliabilitas pada hakikatnya adalah penelitian tentang kegagalan

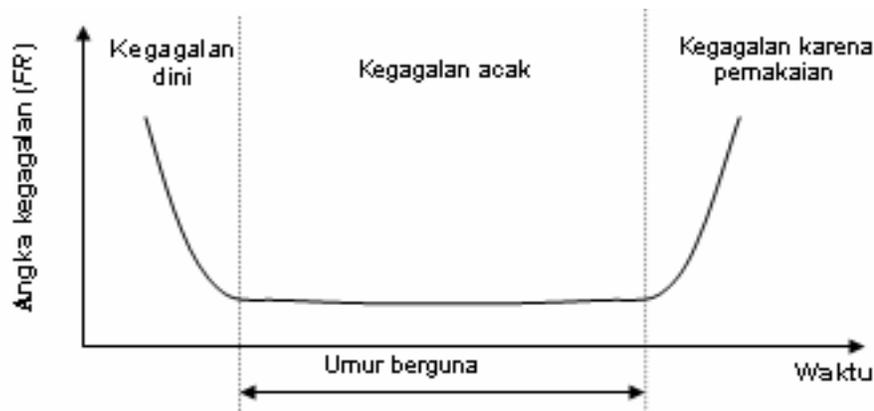
komponen dan sistem. Komponen yang mengalami kegagalan umumnya disebabkan aus yang timbul karena pemakaian dan regangan yang mengenainya. Untuk komponen-komponen elektronik regangan-regangan itu disebabkan oleh^[3]:

- Kondisi operasi pada perancangan. Tegangan dan arus yang dikenakan, daya yang didisipasikan, dan regangan mekanis yang disebabkan oleh cara pemasangan.
- Kondisi lingkungan, yaitu perubahan suhu tinggi atau rendah, kelembaban tinggi, getaran atau kejutan mekanis, tekanan tinggi atau rendah,

atmosfer yang korosif, radiasi lingkungan, debu dan serangan serangga.

Banyaknya kegagalan suatu komponen dapat ditemukan dengan mengoperasikan sejumlah besar komponen itu untuk jangka waktu yang lama lalu mencatat jumlah kegagalan yang terjadi. Periode awal yang tinggi jumlah kegagalannya, dikenal dengan *burnin* atau kegagalan dini, disusul periode yang tingkat kegagalannya menurun sampai suatu harga yang konstan. Periode ini dikenal sebagai periode kegagalan acak atau umur berguna dan merupakan hal yang paling penting karena disini

kegagalan-kegagalan itu terjadi secara acak, yaitu karena kebetulan. Variasi angka kegagalan (*failure rate*) dengan waktu diperlihatkan secara grafik pada Gambar 2, karena bentuknya, grafik ini sering disebut kurva bak-mandi^[3]. Istilah *MTTF* (*mean time to failure*) biasanya dipakai untuk barang-barang yang tidak dapat direparasi, sedang *MTBF* (*mean time between failure*) dipakai untuk barang-barang yang dapat direparasi, seperti instrumen dan sistem. *MTBF* suatu sistem lengkap dapat dihitung dengan pertama kali menemukan jumlah angka-angka kegagalan semua komponen.



Gambar 2. Variasi angka kegagalan dengan waktu^[3].

Untuk suatu rangkaian sederhana yang menggunakan tiga komponen, A, B, C. Angka kegagalan (*FR/failure rate*) total adalah:

$$FR_{(rangkai)} = FR_{(A)} + FR_{(B)} + FR_{(C)} \quad (3)$$

Angka kegagalan sistem atau rangkaian umumnya dinyatakan dengan λ , sehingga,

$$MTBF_{(rangkai)} = 1/\lambda \quad (4)$$

Jika ada angka kegagalan konstan yang berlaku, yaitu kegagalan yang banyak disebabkan oleh kebetulan saja, hubungan antara reliabilitas (R) dan angka kegagalan sistem (λ) ditentukan oleh rumus:

$$R = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

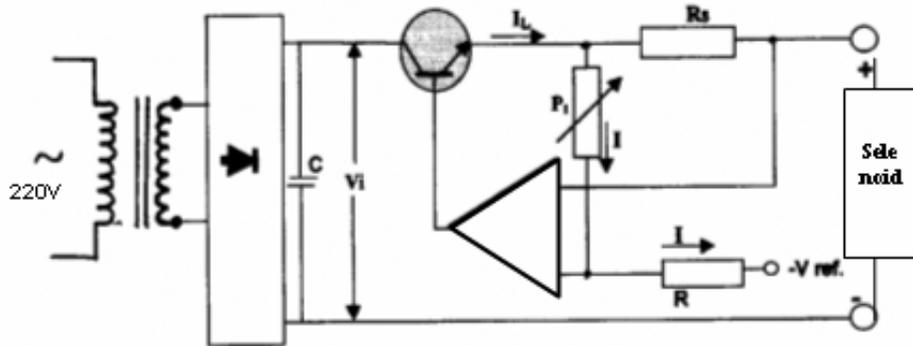
Disini t adalah waktu operasi; λ adalah angka kegagalan sistem yaitu jumlah semua angka kegagalan komponen; dan e adalah basis logaritma natural. R adalah probabilitas kegagalan nol dalam

waktu t . Ketidakhandalan $Q = 1-R = 1 - e^{-\lambda t}$, karena *MTBF* atau $m = 1/\lambda$, maka $\lambda = 1/m$, sehingga $R = e^{-t/m}$. Reliabilitas adalah probabilitas keberhasilan selama suatu periode waktu tertentu dalam kondisi tertentu, dapat mendekati satu (0,999) tetapi tidak akan pernah satu^[3].

TATA KERJA

Rangkaian Regulator Arus

Sumber arus yang dimaksud adalah sumber arus searah untuk mengaliri arus pada selenoid sehingga dihasilkan medan magnet. Sumber arus mempunyai rangkaian penyearah dan perata sebagaimana pada sumber tegangan, namun pada rangkaian regulasi digunakan umpan balik arus. Pada Gambar 3 tampak arus I_L di umpan balik melalui R_s untuk mengendalikan transistor pengatur I_L ^[4].



Gambar 3. Regulator arus^[4].

Mekanisme pengendalian arus dapat digambarkan dengan persamaan sebagai berikut^[4] :

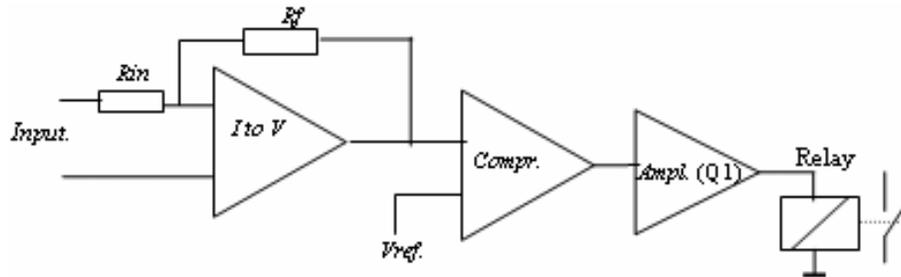
$$\frac{I_L \cdot R_s}{P_1} = I = \frac{V_{ref}}{R} \tag{6}$$

$$I_L = \frac{V_{ref} \cdot P_1}{R \cdot R_s}$$

Rangkaian Protector

Seperti tampak pada Gambar 4, rangkaian *protector* akan menerima arus keluaran dari catu

daya sistem pemfokus yang selanjutnya melalui pengubah arus ke tegangan *I to V* diubah menjadi tegangan dc dalam orde volt. Selanjutnya tegangan ini diumpankan ke sebuah pembanding (*comparator*) untuk dibandingkan dengan sebuah tegangan referensi yang sudah diseti sesuai batas yang telah ditentukan nilainya (dalam orde volt). Jika tegangan masukan lebih besar tegangan referensi maka keluaran pembanding menjadi aktif tinggi membuat transistor Q1 (penguat) menghantar mengaktifkan relai magnetik dan mengubah status keluaran interlok.

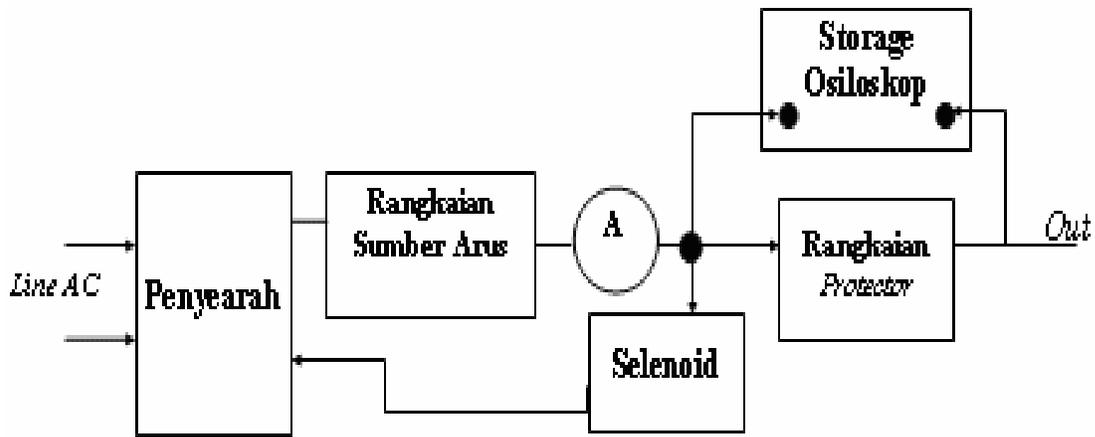


Gambar 4. Rangkaian *protector*^[4].

Pengujian Rangkaian Protector

Pengujian rangkaian *protector* dimaksudkan untuk mengetahui tanggapan dari pada rangkaian *protector* jika arus keluaran dari sistem pemfokus berubah sampai dibawah nilai yang sudah ditentukan, seperti tampak pada Gambar 5. Pengujian ini menggunakan alat bantu ampere meter, volt meter, *oscilloscope* dan beban selenoid. Beberapa parameter untuk pengujian yang

dilakukan antara lain, ketahanan alat dan waktu tanggap sistem *protector* terhadap perubahan arus masukan. Untuk pengujian ketahanan dan kehandalan rangkaian dilakukan dengan mengoperasikan alat selama 120 jam (5 hari) terus menerus tanpa dimatikan dan diamati arus keluarannya secara periodik (tiap empat jam). Percobaan ini dilakukan pada suhu ruangan antara 24 sampai 28 °C.



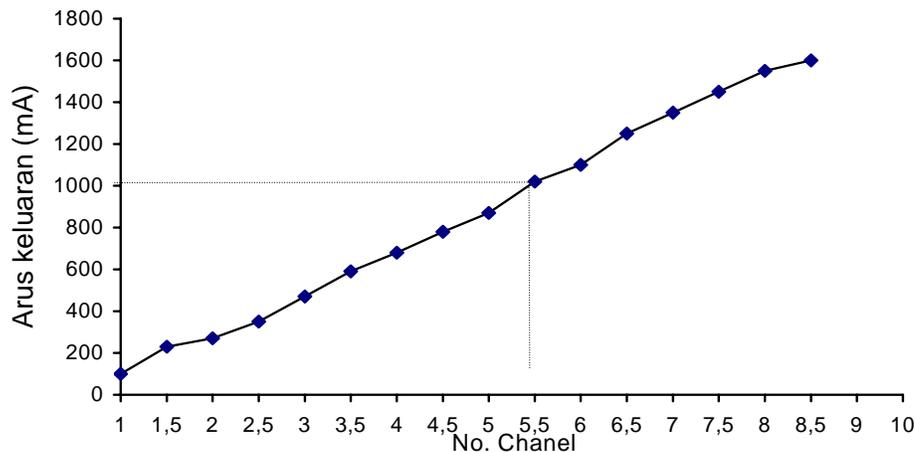
Gambar 5. Diagram pengujian rangkaian *protector* pada catu daya sistem pemfokus.

HASIL DAN PEMBAHASAN

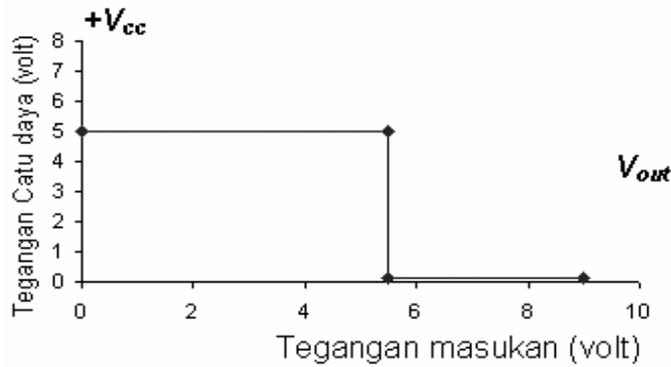
Hasil Pengujian Rangkaian *Protector* Pada Catudaya Sistem Pemfokus

Hasil pengujian menunjukkan bahwa catudaya sistem pemfokus dapat bekerja cukup baik. Dari pengujian pada rangkaian pelindung/*protector* diperoleh bahwa pada saat arus keluaran melebihi 1A, rangkaian *protector* bereaksi dan memberikan perubahan status keluaran interlok seperti dapat

dilihat pada Gambar 6 dan 7. Dari gambar tersebut tampak walaupun arus pemfokus terus dinaikkan sampai diatas ambang batas yang ditentukan (5,5V), keluaran *protector* tetap pada kondisi interlok (aktif). Hal tersebut dikarenakan tegangan masukan sudah melebihi daripada tegangan acuan sehingga keluaran komparator berubah keadaan dan mengaktifkan relai magnetik. Karena kontak-kontak relai dihubung secara seri dengan kontak relai dari parameter lain, maka membuat MBE berhenti operasi atau *shut down*.



Gambar 6. Grafik No.kanal terhadap arus keluaran catudaya.



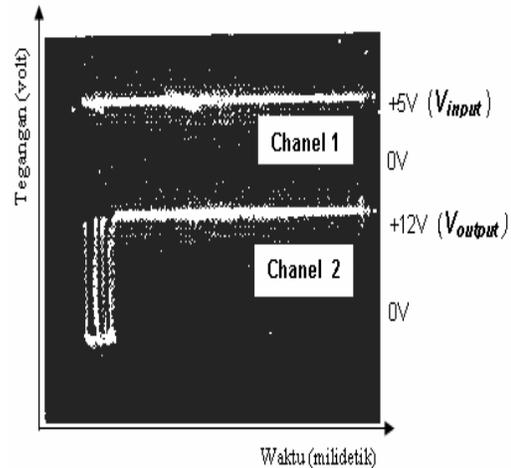
Gambar 7. Kurva fungsi pindah status keluaran rangkaian protector.

Dari hasil pengamatan waktu tanggap rangkaian protector terukur 20 milidetik. Tampak pada Gambar 8, adalah hasil rekaman waktu tanggap dari rangkaian protector. Waktu tanggap ini diukur mulai dari saat terjadi kenaikan arus solenoid hingga diatas ambang batas yang ditentukan sampai terjadi perubahan status interlok. Adanya penundaan waktu dari rangkaian tersebut terutama disebabkan/ didominasi oleh adanya proses pentalan kontak lidah-lidah relai magnetik. Namun demikian nilai penundaan waktu tersebut masih cukup aman bagi sistem keselamatan. Sebagai acuan sistem kesela-matan untuk reaktor, waktu tanggap paling besar yang diijinkan untuk sistem keselamatan berdasar-kan IAEA TECDOC-963 adalah sebesar 60 mili detik.

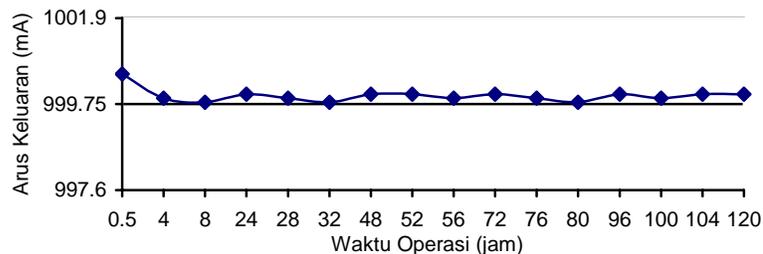
Hasil Pengujian Ketahanan Catudaya Sistem Pemfokus

Dari hasil pengujian ketahanan diperoleh bahwa setelah dioperasikan selama 120 jam terus menerus alat tetap bekerja baik dan normal dengan arus keluaran yang relatif stabil, seperti tampak pada Gambar 9. Dari waktu pengujian ini dapat dihitung angka keandalan sistem pemfokus berdasarkan Tabel 1 (terlampir) dan dengan

mengacu rumus keandalan, $R = e^{-\lambda t}$, dengan t = waktu operasi (jam); $\lambda = (FR)$ adalah laju kegagalan sistem ($10^{-6}/jam$). Dari hasil pengamatan pada tabel diperoleh jumlah laju kegagalan sistem catu daya pemfokus (λ) = $46,27 \cdot 10^{-6} /jam$.



Gambar 8. Hasil pemotretan waktu tanggap rangkaian protector.

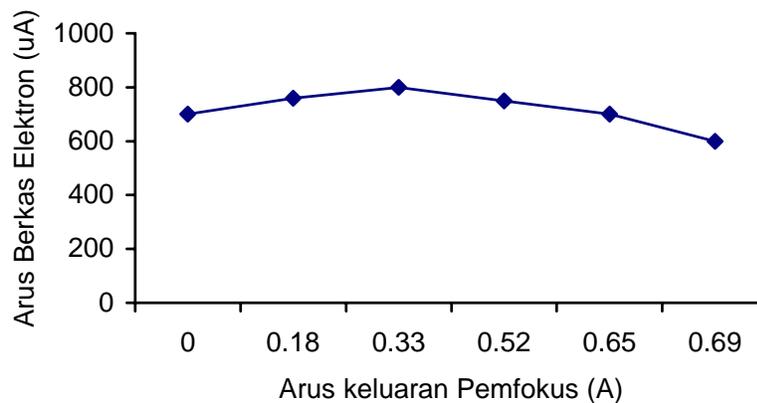


Gambar 9. Grafik hubungan antara arus keluaran pemfokus sebagai fungsi waktu operasi.

Dengan pengoperasian alat selama 120 jam, didapatkan angka kehandalan sistem catu daya pemfokus, $(R) = e^{-(120 \times 46,27 \cdot 10^{-6})} = 0,999$ atau 99,9%. Kehandalan alat untuk periode waktu 120 jam tentu saja tidak akan dianggap mencukupi, namun dikarenakan keterbatasan waktu yang ada untuk melakukan pengujian ini dan akan segera diterapkannya alat tersebut pada MBE, maka lama pengujian operasi sudah dianggap cukup. Suatu alat dengan kehandalan yang baik jika mempunyai nilai kehandalan mendekati satu (yaitu 0,9999). Kehandalan yang baik bergantung pada banyak faktor misalnya, pemilihan komponen, *derating*, perlindungan terhadap regangan-regangan lingkungan, daya operasi dan daya pemeliharaan. Cara lain untuk menyempurnakan kehandalan adalah dengan me-nerapkan sistem redundansi, yaitu menyambungkan sub-unit-sub-unit komponen sehingga jika salah satu mengalami kegagalan yang

lain akan langsung mengambil alih fungsinya. Selanjutnya disajikan pula hasil pengujian sistem pemfokus pada MBE yaitu untuk mengetahui pengaruh arus keluaran pemfokus terhadap perubahan arus berkas elektron, seperti yang disajikan pada Gambar 10.

Dari Gambar 10, tampak bahwa perubahan arus pemfokus berpengaruh terhadap keluaran arus berkas elektron. Dari grafik tersebut menunjukkan arus berkas elektron optimum pada saat arus pemfokus diset pada posisi 0,33A. Pada kondisi ini arus berkas elektron terfokus berada pada ujung masuk kumparan pemayar, sehingga arus berkas elektron yang dipancarkan pada target/bahan optimum. Pada kondisi arus pemfokus 0,33A ini, berkas elektron yang menyebar dapat diminimalisir sehingga kemungkinan terjadinya kerusakan yang fatal akibat tabrakan antara berkas elektron dengan dinding corong pemayar dapat dicegah.



Gambar 10. Perubahan arus pemfokus terhadap arus berkas elektron.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian terhadap sistem pemfokus MBE 350 keV/10 mA yang telah ditingkatkan kinerjanya dengan penambahan rangkaian *protector* diperoleh bahwa alat dapat berfungsi dengan baik dan bekerja normal. Sesuai perhitungan bahwa ambang batas maksimum arus selenoid ditentukan 1A. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa pada saat arus selenoid $\geq 1A$, rangkaian *protector* bekerja mengaktifkan relay magnetik dan mengubah status keluaran interlok. Dari hasil pengamatan waktu tanggap rangkaian

protector terukur sebesar 20 ms., adalah layak digunakan untuk sistem keselamatan pada MBE di P3TM. Untuk uji ketahanan dan kehandalan telah dilakukan pengujian ketahanan alat yaitu dengan mengoperasikan sistem pemfokus selama 120 jam (5 hari) terus menerus tanpa dimatikan dengan beban selenoid. Dari hasil perhitungan uji keandalan diperoleh angka keandalan sistem $(R) = 0,999$ atau 99,9%. Sedangkan dari hasil tes uji fungsi pada MBE, diperoleh arus berkas elektron terukur optimum 800 μA pada kondisi arus pemfokus 0,33A, hal ini menunjukkan bahwa sistem

pemfokus dapat berfungsi baik, dan layak dioperasikan pada MBE 350keV/10mA di P3TM.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SUTADJI S., *dkk.*, *Perencanaan Sistem Optik MBE 500 keV/10 mA*, Seminar Sehari Perancangan MBE 500 keV/10 mA, PPNY-BATAN, Yogyakarta, 1996.
- [2] DJOKO S. PUDJORAHARDJO, *dkk.*, *Rancang Bangun Lensa Magnetik Selenoid Untuk Pemfokus Berkas Elektron Sumber Elektron Tipe Termionik*, PPI Teknologi Akselerator dan Aplikasinya, Volume 2, Nomor 1, BATAN, Yogyakarta, Nopember 2000.
- [3] GEORGE LOVEDAY, *Intisari Elektronika*, Alih bahasa oleh Group Elekmedia Komputindo, Jakarta 1992.
- [4] WIDI SETIAWAN, *Instrumentasi dan Kendali*, Diklat. Pengenalan dan Aplikasi Akselerator, P3TM-BATAN, Yogyakarta, 1998.

LAMPIRAN

A. Pengukuran arus keluaran catu daya sistem pemfokus dengan rangkaian protector untuk menentukan status interlok :

| Skala Potensio Mtr. | Arus keluaran terukur (mA) |
|---------------------|----------------------------|
| 1 | 100 |
| 1,5 | 230 |
| 2 | 270 |
| 2,5 | 350 |
| 3 | 470 |
| 3,5 | 590 |
| 4 | 680 |
| 4,5 | 780 |
| 5 | 870 |
| 5,5 | 1020 |
| 6 | 1100 |
| 6,5 | 1250 |
| 7 | 1350 |
| 7,5 | 1450 |
| 8 | 1550 |
| 8,5 | 1600 |

B. Data pengamatan $\lambda =$ (failure rate) pada catu daya sistem pemfokus MBE.

| No | Nama komponen | Angka kegagalan FR ($10^{-6}/\text{jam}$) | Jumlah komponen (n) | Jumlah (n) . FR ($10^{-6}/\text{jam}$) |
|----|------------------|---|---------------------|--|
| 1 | Transistor < 1W | 0,08 | 4 | 0,32 |
| 2 | Transistor > 1W | 0,8 | 4 | 3,2 |
| 3 | Resistor karbon | 0,05 | 28 | 1,4 |
| 4 | Kapasitor elco | 1,5 | 12 | 18 |
| 5 | Kapasitor milar | 0,1 | 11 | 1,1 |
| 6 | Potensio m. | 3 | 3 | 9 |
| 7 | IC linier | 0,3 | 4 | 1,2 |
| 8 | Diode signal | 0,5 | 14 | 7 |
| 9 | Diode power | 0,1 | 5 | 0,5 |
| 10 | Trafo | 0,4 | 1 | 0,4 |
| 11 | Saklar | 0,1 | 2 | 0,2 |
| 12 | Lampu led | 0,1 | 1 | 0,1 |
| 13 | Sambungan solder | 0,01 | 205 | 2,05 |
| | | | Jumlah | 46,27 |

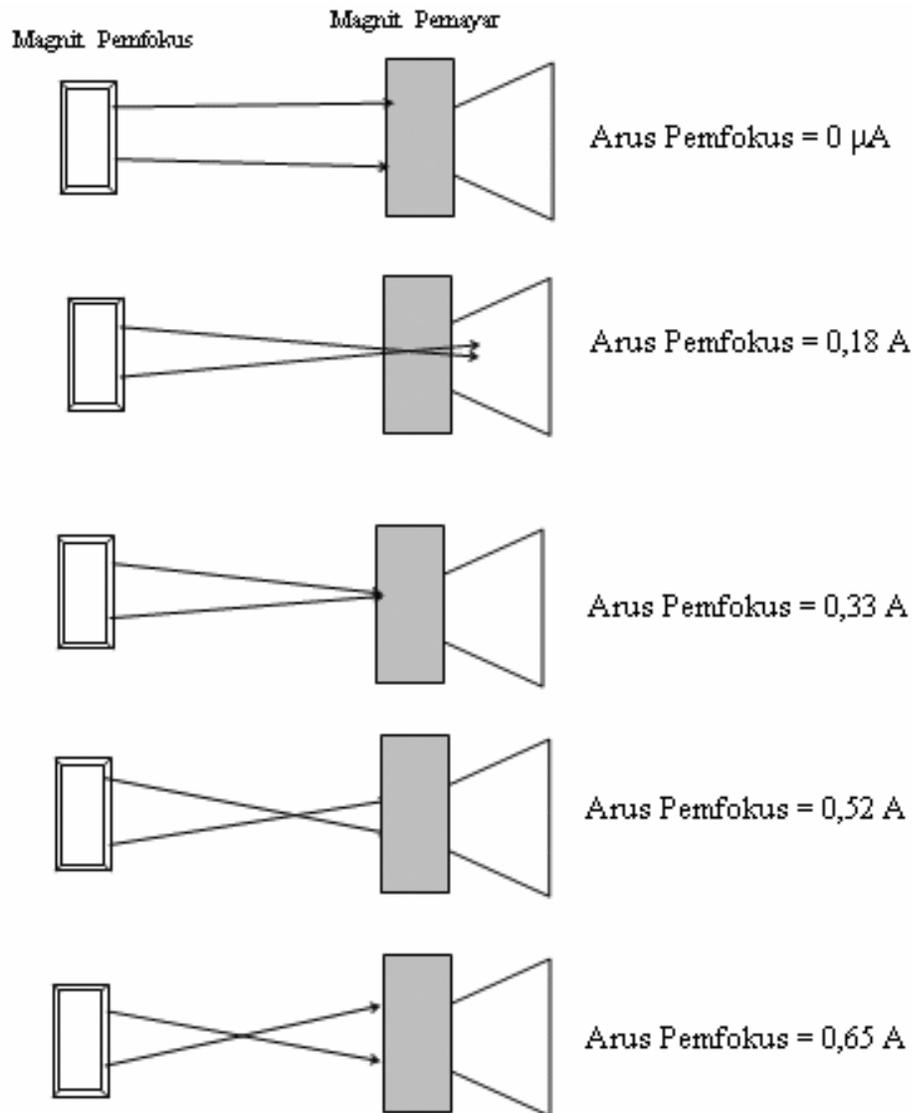
C. Data Pengukuran Pemfokusan MBE

| No | Arus Pemfokus (A) | Arus Berkas Elektron (μA) |
|----|-------------------|--|
| 1 | 0 | 700 |
| 2 | 0,18 | 760 |
| 3 | 0,33 | 800 |
| 4 | 0,52 | 750 |
| 5 | 0,65 | 700 |
| 6 | 0,69 | 600 |

D. Data pengukuran kestabilan catudaya sistem pemfokus MBE

| No | Waktu (Jam) | Arus pemfokus (mA) |
|----|-------------|--------------------|
| 1 | 0,5 | 1000,5 |
| 2 | 4 | 999,9 |
| 3 | 8 | 999,8 |
| 4 | 24 | 1000,0 |
| 5 | 28 | 999,9 |
| 6 | 32 | 999,9 |
| 7 | 48 | 1000,0 |
| 8 | 52 | 1000,0 |
| 9 | 56 | 999,9 |
| 10 | 72 | 1000,0 |
| 11 | 76 | 999,9 |
| 12 | 80 | 999,9 |
| 13 | 96 | 1000,0 |
| 14 | 100 | 999,9 |
| 15 | 104 | 1000,0 |
| 16 | 120 | 1000,0 |

E. Ilustrasi proses pemfokusan berkas Elektron.



TANYA JAWAB

Djoko S.

- Rangkaian yang ditambahkan (protector) dapat berfungsi baik, mohon penjelasan secara kualitatif.

Saminto

- Selama uji fungsi, rangkaian *protector* dapat be-

kerja sesuai yang diharapkan tanpa terjadi gangguan. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa saat arus pemfokus melebihi nilai batas yang ditentukan ($= 1\text{A}$), rangkaian ini bereaksi dan merubah status keluaran interlok dengan waktu tanggap 20 mili detik. Oleh karena itu penambahan rangkaian *protector* pada catu daya pemfokus berguna sebagai salah satu pengamanan pada operasi MBE.