

RANCANGAN PERISAI RADIASI MESIN BERKAS ELEKTRON 300 kV/20 mA UNTUK IRRADIASI LATEKS ALAM

Rany Saptaja, Sutadi, Setyo Atmojo

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Badan Tenaga Nuklir Nasional

ABSTRAK

RANCANGAN PERISAI RADIASI MESIN BERKAS ELEKTRON 300 kV/20 mA UNTUK IRRADIASI LATEKS ALAM. Telah dibuat rancangan perisai radiasi mesin berkas elektron (MBE) 300 kV/20 mA pada daerah terkontrol. Dengan beroperasinya mesin berkas elektron, maka timbul sinar X yang dapat membahayakan keselamatan dan kesehatan manusia apabila dosisnya berlebihan. Oleh karena itu antara MBE dengan daerah kerja (daerah terkontrol) perlu diberi perisai radiasi demi keselamatan pekerja dari bahaya radiasi. Perisai radiasi berfungsi untuk menahan/mengurangi sinar X yang diterima pekerja radiasi. Rancangan perisai radiasi ini meliputi penentuan bentuk, dimensi, bahan, dan gambar kerja, dengan mempertimbangkan besarnya sumber radiasi sinar X dan bahan perisai yang digunakan. Perisai radiasi antara MBE dengan daerah kerja dibuat dari bahan timbal (Pb) dengan tebal 2,5 cm, dengan ketentuan laju dosis paparan radiasi $\leq 2,5$ mrem/jam.

Kata kunci: sinar X, perisai radiasi, mesin berkas elektron

ABSTRACT

DESIGN OF RADIATION SHIELDING OF 300 kV/20 mA ELECTRON BEAM MACHINE (EBM) FOR NATURAL LATEX IRRADIATION. Design of the radiation shielding for controlled area of 300 kV/20 mA electron beam machine has been done. When electron beam machine is in operation, the X rays will be produced. It is a dangerous for healthy and personal safety, when the radiation dose greater than the permissible dose. Therefore between the EBM and working area are necessary to be constructed a radiation shielding for safety personel from radiation hazard. The function of radiation shielding is to shield or to reduce X rays. The design of radiation shielding consists of determination of model, dimension, material, and drawing of radiation shielding, and then considerate of X ray source and the type of shielding material. The radiation shielding between EBM and working area were made from Plumbum (Pb) with thickness of 2.5 cm, with the permissible exposure dose rate of 2.5 mrem/hour.

Key words: X ray, radiation shielding, electron beam machine

PENDAHULUAN

Salah satu program BATAN adalah membangun mesin berkas elektron (MBE) 300 kV/20 mA untuk irradiasi lateks alam, yang pelaksanaannya dikerjakan di Bidang Teknologi Akselerator dan Fisika Nuklir PTAPB Yogyakarta. Dalam pengoperasian mesin berkas elektron harus diikuti dengan pelaksanaan kegiatan yang berpedoman kepada perundangan yang berlaku. Pelaksanaan kegiatan ini dimulai sejak perancangan sampai tingkat komisiuning dan berlaku pula ketika MBE dioperasikan. Salah satu bagian yang menjadi perhatian adalah keselamatan personil dari bahaya radiasi yang ditimbulkan MBE ketika beroperasi. Peraturan proteksi radiasi dan ketentuan keselamatan kerja terhadap radiasi

didasarkan pada prinsip bahwa, bekerja dengan menggunakan sumber radiasi pengion dapat dan boleh dilakukan dengan cara membatasi dosis radiasi yang diterima oleh seseorang (pekerja radiasi) sampai serendah mungkin.

Dalam mesin berkas elektron, partikel elektron yang dipercepat di dalam tabung pemercepat akan menghasilkan berkas elektron dengan energi yang cukup tinggi dengan arus berkas tertentu. Berkas elektron energi tinggi akan ditembakkan/dikenakan pada bahan target. Akan tetapi sebelum mengenai target, berkas elektron mengenai material sepanjang lintasannya. Akibat interaksi antara berkas elektron dengan material sepanjang lintasannya, akan menghasilkan sinar X. Secara teori sinar X berenergi tinggi cukup berbahaya bagi kesehatan dan keselamatan manusia.

Semakin besar tegangan pemercepat MBE, maka semakin tinggi energi sinar X yang dibangkitkan. Demikian pula semakin besar arus berkas elektron yang digunakan, maka semakin besar intensitas radiasi sinar X yang dibangkitkan. Kondisi ini akan menyebabkan besar kecilnya laju dosis paparan pada suatu tempat. Oleh karena itu, fungsi perisai radiasi menjadi sangat penting dalam memberikan keselamatan bagi operator maupun lingkungan dari bahaya sinar X. Perhitungan ketebalan perisai radiasi akan menentukan kemampuannya dalam menyerap radiasi sinar X. Fungsi perisai radiasi harus memenuhi ketentuan keselamatan yang dikeluarkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), yang intinya adalah ruang penyinaran harus didesain sedemikian rupa sehingga paparan radiasi pada ruang terkontrol (*control area*) tidak melebihi 25 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ (2,5 mrem/jam).

Berdasarkan hal tersebut maka perlu dirancang perisai radiasi antara MBE dengan daerah kerja sebagai pengaman radiasi pada saat MBE beroperasi. Perisai radiasi ini direncanakan menggunakan bahan-bahan yang cukup efektif untuk menyerap sinar X, seperti timbal atau besi. Perisai radiasi yang dirancang sebagian besar merupakan konstruksi mekanik yang berfungsi untuk menahan/mengurangi radiasi sinar X yang timbul akibat beroperasinya MBE, sehingga tidak membahayakan bagi orang yang bekerja di sekitar MBE. Ketebalan perisai radiasi dirancang berdasarkan pada besarnya energi dan arus berkas elektron maksimum yang dihasilkan oleh MBE. Berikut ini disampaikan rancangan perisai radiasi sinar X untuk MBE 300 kV 20 mA dengan menggunakan bahan timbal dan besi.

TEORI

Sinar X akan terbentuk apabila zarah ringan bermuatan, misalnya elektron oleh pengaruh gaya inti atom bahan mengalami perlambatan. Sinar X yang merupakan gelombang elektromagnet yang terbentuk melalui proses ini disebut sinar X *bremstrahlung*. Sinar X yang terbentuk dengan cara demikian mempunyai energi paling tinggi sama dengan energi kinetik zarah bermuatan pada waktu terjadinya perlambatan. Pada proses *bremstrahlung* sinar X mempunyai kemungkinan dipancarkan ke segala arah.

Jenis radiasi yang mempunyai potensi bahaya bila berada di luar tubuh (eksternal) adalah radiasi neutron, sinar gamma maupun sinar X, sebab mempunyai jangkauan yang panjang, daya tembus

besar dan bersifat pengion. Radiasi pengion adalah radiasi yang apabila melintasi bahan atau jaringan biologi dapat mengionisasi bahan atau sel jaringan. Proses ionisasi selalu mengubah atom atau molekul, sehingga dapat mengubah struktur molekul yang mengandung atom itu. Jika molekul yang terpengaruh ada dalam sel yang hidup, kadang-kadang sel itu dapat rusak, baik secara langsung, yaitu jika molekul memegang peran menentukan bagi sel; maupun secara tidak langsung melalui perubahan kimia yang terjadi dalam molekul di dekatnya, misalnya melalui terbentuknya radikal bebas.

Manusia menerima paparan radiasi yang berasal dari alam (sinar kosmik), sumber radiasi untuk medik (kedokteran), industri dan pekerjaan yang melibatkan pemakaian zat radioaktif dan atau sumber radiasi. Dosis radiasai sekecil apapun sudah dianggap mempunyai efek terhadap jaringan tubuh, meskipun efek tersebut baru terlihat bila dosisnya melebihi dosis ambang. Untuk sumber radiasi yang mempunyai potensi bahaya eksternal, penerimaan radiasi dapat dikurangi dengan pengendalian sebagai berikut: pembatasan jangka waktu kerja pada daerah medan radiasi, pembatasan jarak terhadap sumber radiasi, dan penggunaan perisai radiasi.

Dalam kaitannya dengan bahan perisai untuk radiasi sinar X, umumnya dipakai bahan yang mempunyai densitas tinggi seperti beton, besi dan timbal, karena bahan tersebut cukup efektif untuk menyerap radiasi gamma dan sinar X^[1]. Perisai radiasi yang dipakai disini harus mampu menahan radiasi sinar X yang timbul akibat beroperasinya MBE, sehingga tidak membahayakan bagi pekerja yang berada di luar ruang MBE. Syarat agar pekerja radiasi tidak menerima dosis melebihi batas maksimum yang diijinkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nasional, yaitu 50 mSv/tahun, maka laju dosis di luar MBE harus $\leq 25 \mu\text{Sv}/\text{jam}$ (2,5 mrem/jam).

Pada umumnya, setiap radiasi nuklir yang melewati suatu bahan akan berinteraksi dengan unsur penyusun bahan, yang berakibat berpindahnya energi radiasi kepada unsur tersebut. Perpindahan energi akan menyebabkan radiasi terserap dalam bahan tersebut, dimana besar kecilnya jumlah berkas radiasi yang lolos akan tergantung pada besarnya nilai koefisien serapan linier bahan dan tebal bahan. Jika bahan perisai terdiri dari unsur yang murni, maka hubungan antara intensitas radiasi sebelum dan sesudah melewati bahan perisai dapat dinyatakan dengan persamaan 1^[2].

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (1)$$

dengan:

I_0 = intensitas radiasi sebelum melewati bahan

I = intensitas radiasi setelah melewati bahan

μ = koefisien serapan linier bahan (cm^{-1})

x = tebal bahan perisai (cm)

Jika I_0 dapat diukur, x diketahui, maka I dapat dihitung atau diukur. Apabila bahan perisai terdiri dari beberapa unsur, maka μ bahan perisai dihitung terlebih dahulu berdasar μ dan fraksi berat masing-masing unsur pembentuk bahan perisai^[3] Pernyataan ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan 2.

$$(\mu/\rho)_b = \sum w_i (\mu/\rho)_i \quad (2)$$

dengan:

$(\mu/\rho)_b$ = koefisien serapan massa bahan (cm^2/gram)

$(\mu/\rho)_i$ = koefisien serapan massa unsur penyusun bahan (cm^2/gram)

w_i = fraksi berat unsur penyusun bahan

Dalam pembuatan rancangan ini besarnya I_0 belum diketahui, sehingga digunakan metode lain untuk memperoleh ketebalan perisai, yaitu dengan persamaan umum perhitungan laju indeks dosis ekivalen, seperti ditunjukkan dalam persamaan 3 berikut^[4]:

$$B_x \geq (1,67 \times 10^{-5}) \left[\frac{H_m d^2}{D_0 T} \right] \quad (3)$$

dengan:

B_x = rasio transmisi perisai untuk sinar X

H_m = batas laju dosis maksimum yang digunakan (mrem jam^{-1})

d = jarak antara sumber sinar X dengan titik yang ditinjau

D_0 = indeks laju dosis terserap pada jarak acuan standar 1 m dari sumber sinar X ($\text{rads m}^2 \text{ menit}^{-1}$)

T = faktor penempatan

Untuk menghitung tebal perisai, harus dihitung terlebih dahulu banyaknya *tenth value layer* (TVL) dengan persamaan 4^[4].

$$n = \log (1/B_x) \quad (4)$$

dengan:

n = banyaknya TVL

Tebal perisai radiasi dapat dihitung menggunakan persamaan 5 berikut^[4]:

$$S = T_i + (n - 1) T_e \quad (5)$$

dengan:

T_i = TVL pertama yang langsung berhadapan dengan sumber

T_e = TVL berikutnya (setelah T_i)

S = tebal perisai

Untuk lebih amannya tebal perisai radiasi (S) direkomendasikan untuk ditambah 1 *half value layer* (HVL)^[5]. Sedangkan harga D_0 , T_i , T_e dan HVL dapat diperoleh dengan cara melihat/membaca kurva pada Gambar 1, 2, 3 dan Tabel 4 terlampir. D_0 dapat dihitung dengan membaca kurva pada Gambar 1. T_i dan T_e dapat dihitung dengan membaca kurva pada Gambar 2 dan 3. Sedangkan HVL dapat dilihat pada Tabel 4. Dari beberapa rumusan diatas diharapkan dapat memberikan pertimbangan rancangan yang lebih terinci serta pembuatan perisai radiasi yang lebih baik.

METODA PERHITUNGAN

Perhitungan Tebal Perisai

Untuk menentukan tebal perisai dari bahan timbal agar mampu menahan radiasi sinar X sehingga paparan radiasi menjadi $\leq 2,5$ mrem/jam, diperlukan perhitungan menggunakan persamaan 3, 4 dan 5 serta data teknis sebagai berikut:

MBE 300 keV/20 mA

E = 300 keV

I = 20 mA

$d(90^\circ)$ = 0,5 m

T = 1

H_m = 2,5 mrem/jam

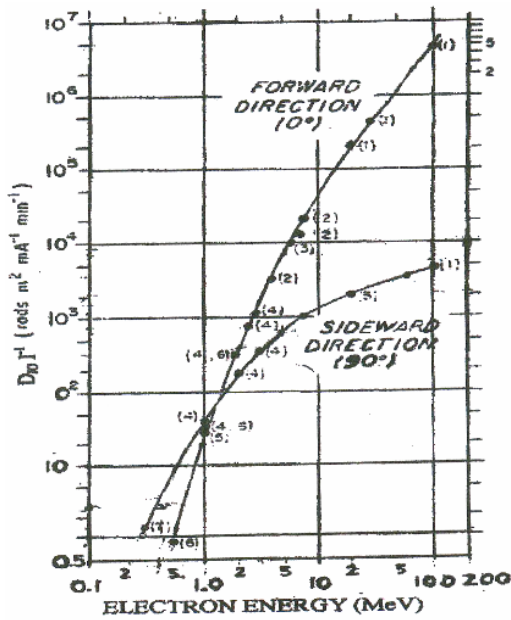
Perhitungan indeks laju dosis serap (D_0) pada arah 90° terhadap arah berkas elektron, pada jarak 1 meter dari sumber radiasi sinar X sebagai berikut:

Lihat kurva pada Gambar 1, dimana berkas elektron berinteraksi dengan bahan tungsten (W) dengan arah berkas 90° terhadap arah sinar X.

$$D_0(90^\circ, W) = 1,5 \text{ rad m}^2 \text{ mA}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

Untuk arus berkas = 20 mA, maka:

$$\begin{aligned} D_0(90^\circ, W) &= 20 \times 1,5 \text{ rad m}^2 \text{ min}^{-1} \\ &= 30 \text{ rad m}^2 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$



Gambar 1. X-ray emission rates from high-Z targets^[4].

Menghitung B_x pada arah 90° terhadap arah berkas elektron menggunakan persamaan 3

$$B_x = (1,67 \times 10^{-5}) \left[\frac{H_m d^2}{D_0 T} \right]$$

$$B_x = (1,67 \times 10^{-5}) \left[\frac{2,5 \times (0,5)^2}{30 \times 1} \right]$$

$$B_x = 3,479 \times 10^{-7}$$

$$n = \log (1/B_x)$$

$$= \log (1/3,479 \cdot 10^{-7}) = 6,4585$$

Dari kurva pada Gambar 2 diperoleh:

$$T_i = 0 \text{ cm}$$

$$T_e = 0,4 \text{ cm}$$

Dengan menggunakan persamaan 5, dapat dihitung besarnya tebal perisai radiasi (S) sebagai berikut:

$$S = T_i + (n - 1) T_e$$

$$= 0 + (6,458 - 1) 0,4$$

$$= 2,1834 \text{ cm}$$

Untuk lebih amannya direkomendasikan tebal perisai ditambah 1 HVL , sehingga:

$$S' = S + HVL$$

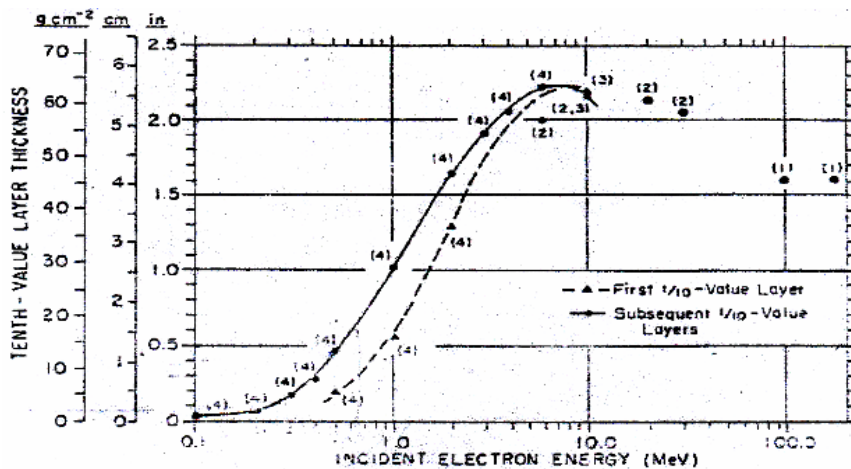
Pada Tabel 4 (terlampir) dapat dilihat besarnya HVL untuk timbal (*lead*) pada tegangan pemercepat elektron = 300 keV adalah 0,147 cm

$$S' = 2,1834 + 0,147$$

$$= 2,3304 \text{ cm}$$

Jadi tebal perisai radiasi pada jarak 0,5 m dari sumber adalah 2,3304 cm, dengan bahan dari timbal $\rho = 11,34 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

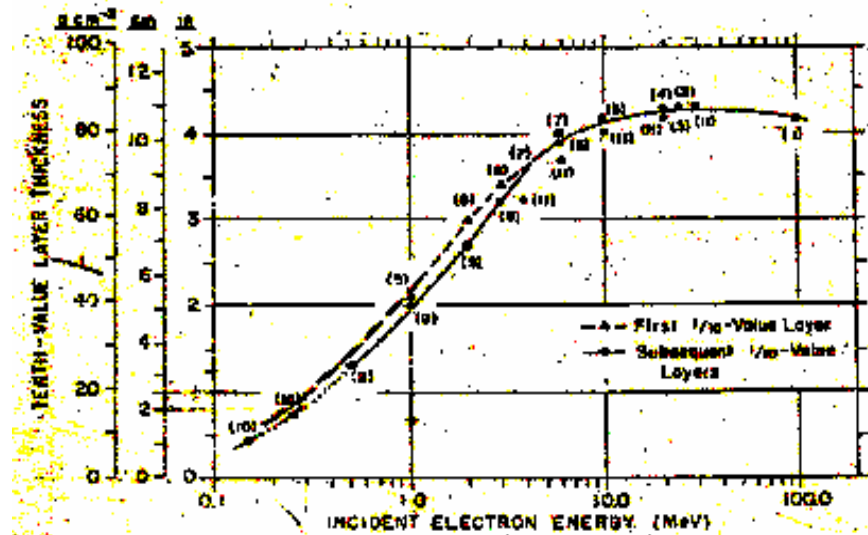
Untuk perhitungan tebal perisai menggunakan bahan besi, harga D_0 dikalikan dengan faktor pengali sebesar 0,5. Faktor pengali diambil dari Tabel 1.



Gambar 2. Dose equivalent index tenth value layers for broad beam X-rays in lead^[4].

Tabel 1. Laju emisi sinar X dari elektron yang mengenai target dengan Z rendah^[4].

No.	Target	Z	Faktor pengali
1.	Besi atau tembaga	26 atau 29	0,5
2.	Alumunium atau beton	13	0,3

Gambar 3. Dose equivalent index tenth value layers for broad beam X-rays in iron^[4].

Dengan cara yang sama untuk menghitung tebal perisai dari bahan timbal, diperoleh tebal perisai dari bahan besi sebesar 12,815 cm. Berdasarkan hasil perhitungan tebal perisai ini, maka dibuat rancangan konstruksi perisai radiasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4, 5, 6, 7 dan 8 (terlampir).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan perisai radiasi yang ditempatkan di antara sumber radiasi dan orang, adalah suatu cara untuk menekan penerimaan dosis agar tidak melebihi ketentuan yang telah ditetapkan oleh BAPETEN yaitu yang biasa disebut Nilai Batas Dosis (NBD). Pemakaian perisai radiasi di sekitar MBE merupakan salah satu syarat mutlak dalam pengoperasian MBE, guna melindungi pekerja dari bahaya radiasi sinar X. Prinsip perisai radiasi adalah mengurangi fluks radiasi di balik perisai, pengurangan ini dapat terjadi karena adanya interaksi antara radiasi dengan bahan perisai.

Di dalam perancangan perisai radiasi ada beberapa hal yang menjadi pertimbangan agar perisai radiasi dapat berfungsi dengan baik, antara lain:

1. Perisai radiasi harus mampu menahan radiasi sinar X yang ditimbulkan oleh MBE, sehingga orang yang bekerja di sekitar MBE tetap aman selama mesin beroperasi.
2. Perisai radiasi dibuat dari bahan yang cukup efektif untuk menyerap radiasi sinar X.
3. Perisai radiasi dibuat ringkas agar lebih kompak dan mudah dipindahkan.

Berdasarkan pertimbangan tersebut di atas, maka dihitung tebal perisai radiasi dari bahan timbal dan besi, karena bahan tersebut cukup efektif untuk menyerap radiasi gamma dan sinar X, sehingga mampu menahan sinar X yang timbul akibat beroperasinya MBE. Perhitungan tebal perisai radiasi didasarkan pada kebolehjadian terbesar timbulnya radiasi sinar X, yaitu saat MBE beroperasi pada daya maksimal (tegangan 300 kV dan arus berkas 20 mA). Hasil perhitungan tebal perisai radiasi dari bahan timbal dan besi, dengan ketentuan pekerja radiasi tidak menerima dosis melebihi batas laju dosis yang diijinkan yaitu 2,5 mrem/jam, disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan tebal perisai radiasi.

No	Jenis bahan perisai	Massa jenis bahan (gr/cm ³)	Energi elektron (keV)	Arus berkas (mA)	Jarak perisai dengan sumber (m)	Tebal perisai radiasi (pada laju dosis maksimal 2,5 mrem/jam)
1.	Timbal (Pb)	11,34	300	20	0,5	2,3304 cm
2.	Besi (Fe)	7,86	300	20	0,5	12,815 cm

Tabel 3. Spesifikasi teknik perisai radiasi.

1.	Bahan perisai	:	Timbal (Pb)
2.	Densitas bahan (ρ)	:	11,34 .10 ³ kg/m ³
3.	Tebal perisai	:	2,5 cm = 25 mm
4.	Jarak sumber radiasi dengan perisai	:	0,5 m

Dari kedua bahan tersebut dipilih bahan perisai dari timbal, karena perisai dari bahan timbal dimensinya lebih ringkas/tipis dari pada besi. Hasil perhitungan diperoleh ketebalan perisai radiasi dari bahan timbal adalah 2,3304 cm, akan tetapi dalam konstruksinya dibuat 2,5 cm. Pada sambungan antar lempeng timbal dibuat miring berlekuk dengan sudut 45°, dengan tujuan apabila disusun bertumpuk berkas sinar X yang menabrak perisai radiasi tidak dapat langsung melewati sela-sela sambungan antara lempengan timbal, seperti ditunjukkan pada Gambar 8 terlampir.

Perisai radiasi dibuat dalam bentuk potongan-potongan lempeng timbal dengan ukuran maksimum 135 cm x 25 cm x 2,5 cm, berat sekitar 100 kg dengan tujuan agar lebih ringan, sehingga memudahkan dalam pencetakan maupun pemasangan dalam kerangka, serta mudah untuk dipindahkan. Pemasangan pada kerangka menggunakan baut dimana kepala baut mempunyai ketebalan tertentu sehingga dapat menahan radiasi yang lewat lubang baut. Pintu untuk keluar masuknya lateks diberi seal karet pada permukaan pintu dan kerangka yang bersentuhan agar rapat, dengan tujuan agar gas ozon yang timbul dari proses irradiasi tidak keluar, walaupun dalam proses irradiasi gas ozon di sekitar MBE dihisap dengan blower. Hasil rancangan perisai radiasi ini merupakan acuan untuk pembuatan perisai radiasi MBE 300 keV / 20 mA. Dari hasil perhitungan rancangan detil perisai radiasi tersebut, dapat dibuat spesifikasi teknik seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

KESIMPULAN

Rancangan perisai radiasi ini meliputi penentuan bentuk, dimensi, bahan, dan gambar konstruksi. Perisai radiasi pengaman MBE dibuat dari bahan timbal (Pb) dengan tebal 2,5 cm. Ketebalan perisai radiasi hasil rancangan ini sudah memenuhi syarat sebagai perisai radiasi dengan ketentuan batas laju dosis yang diijinkan 2,5 mrem/jam. Rancangan perisai radiasi ini merupakan acuan untuk pembuatan perisai radiasi MBE 300 keV/20 mA.

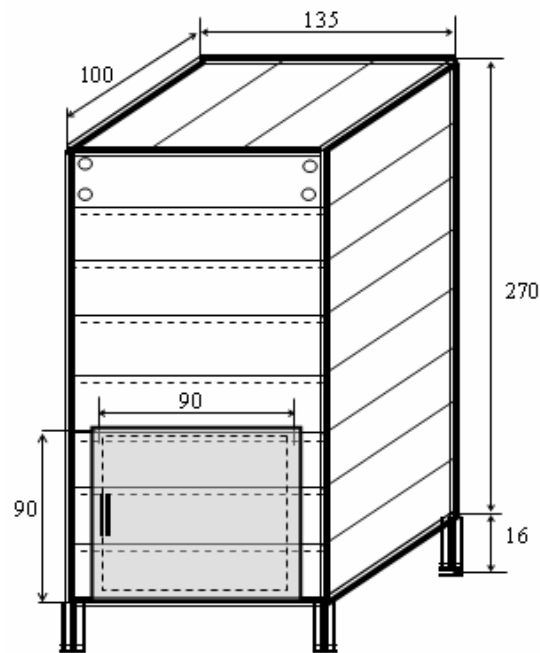
DAFTAR PUSTAKA

- [1] SUWARNO WIRYOSIMIN, *Mengenal Asas Proteksi Radiasi*, Penerbit ITB Bandung, 1995.
- [2] R.M. SINGRU, *Introduction to Nuclear Physics*, Virendra J, Majmudar for Wiley Eastern Private Limited, New Delhi, 1972.
- [3] R.G. JAEGER dkk., *Shielding Fundamentals and Methods Volume 1*, Engineering Compendium on Radiation Shielding, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1968.
- [4] NCRP Report No. 51, *Radiation Protection Design Guidelines for 0.1 – 100 MeV Particle Accelerator Facilities*, Issued, March 1977.
- [5] BATAN-JAERI, *Radiation Shielding Design For X-Ray Room*, Training Course on Radiation Protection, Jakarta,

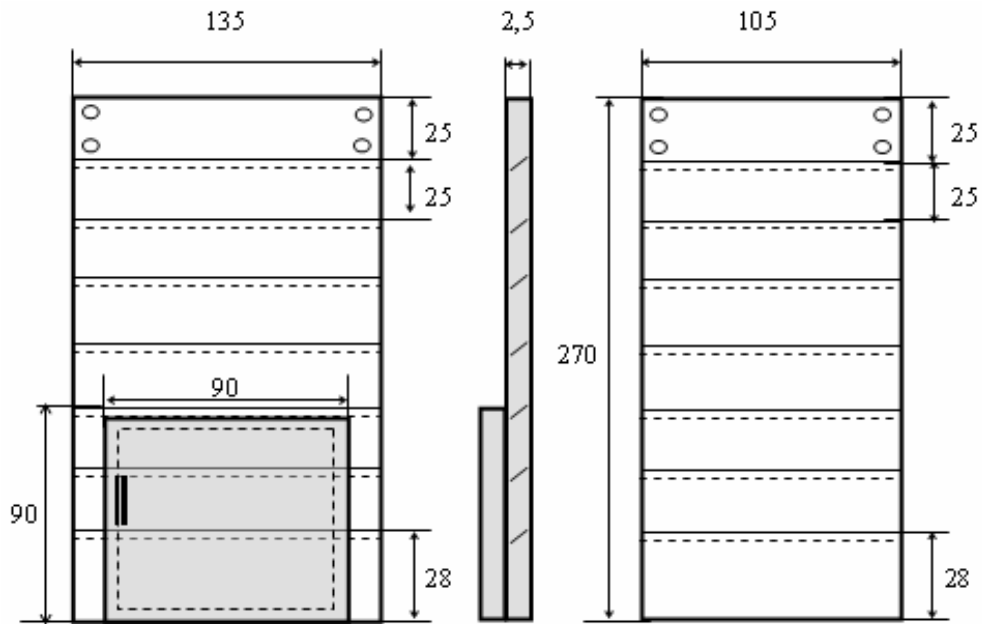
LAMPIRAN

Tabel 4. Half-Value and Tenth-Value Layers^[5].

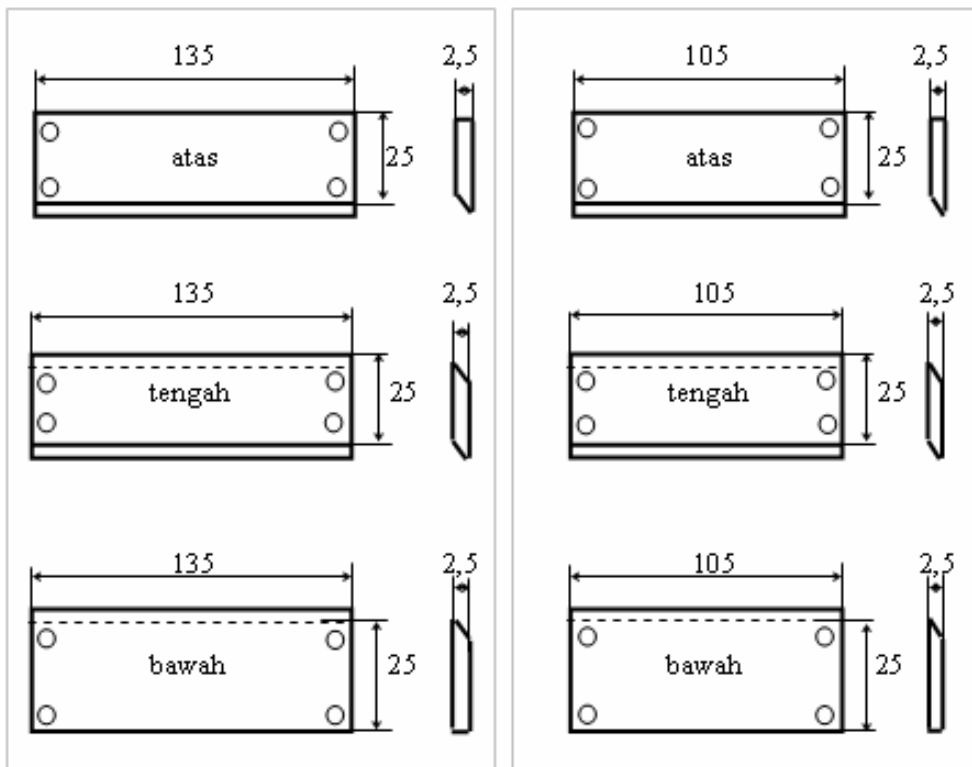
Peak Voltage (kV)	Attenuation material					
	Lead (mm)		Concrete (cm)		Iron (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL
70	0.17	0.52	0.84	2.8		
100	0.27	0.88	1.6	5.3		
125	0.28	0.93	2.0	6.6		
150	0.30	0.99	2.24	7.4		
200	0.52	1.7	2.5	6.4		
250	0.88	2.9	2.8	9.4		
300	1.47	4.8	3.1	10.4		
400	2.5	8.3	3.3	10.9		
500	3.6	11.9	3.6	11.7		
1000	7.9	26	4.4	14.7		
2000	12.5	42	6.4	21		
3000	14.5	48.5	7.4	24.5		
4000	16	53	8.8	29.2	2.7	9.1
6000	16.9	56	10.4	34.5	3.0	9.9
8000	16.9	56	11.4	37.8	3.1	10.3
10000	16.6	55	11.9	39.6	3.2	10.5
Cs-137	6.5	31.6	4.8	15.7	1.6	5.3
Co-60	12	40	6.2	20.6	2.1	6.9



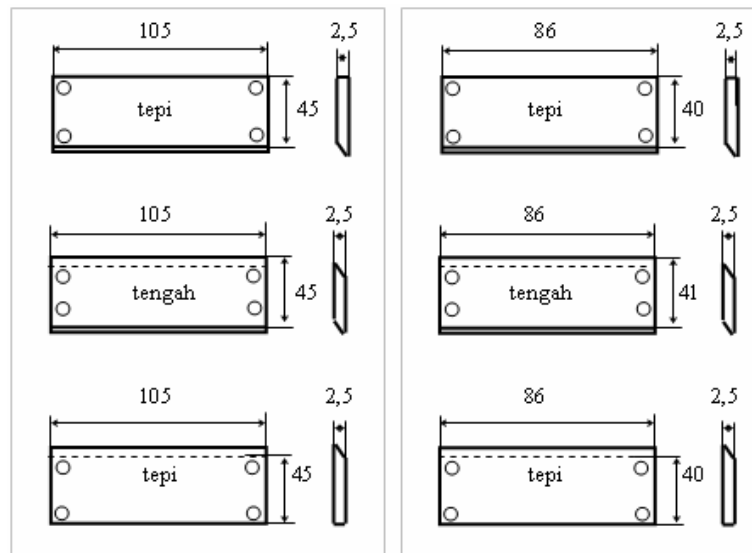
Gambar 4. Skema perisai radiasi.



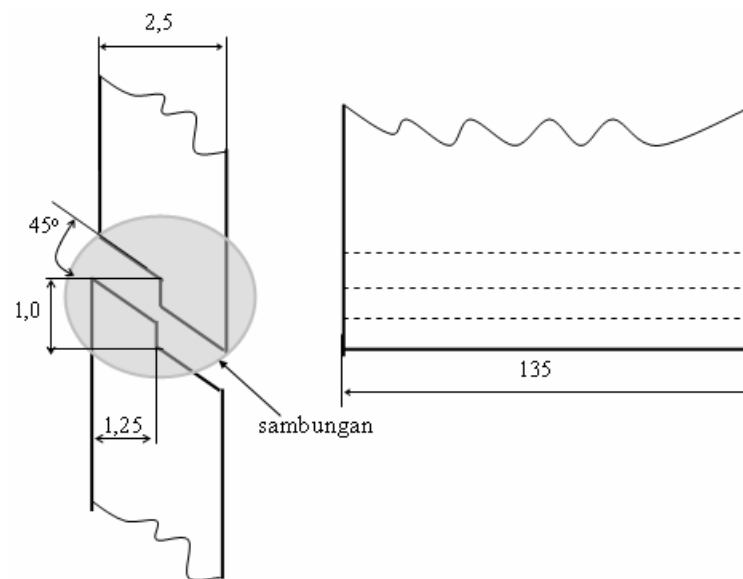
Gambar 5. Perisai depan dan samping.



Gambar 6. Potongan perisai depan-belakang dan perisai samping kanan-kiri.



Gambar 7. Potongan perisai atas dan perisai bawah.



Gambar 8. Bentuk sambungan antar potongan perisai timbal.

TANYA JAWAB

Herry Poernomo

- Rancangbangun MBE untuk irradiasi lateks alam dibutuhkan waktu sekitar 5 tahun, apakah kegiatan ini ada didalam ARN?

- Bagaimana kalau setelah selesai, lebih difokuskan ke rancangbangun MBE untuk flue gas treatment yang sudah jelas diagendakan dalam ARN.

Rany Saptaji

- Tidak ada di ARN.
- Ya, sedang direncanakan.