

# RANCANGAN DAN KONSTRUKSI PERISAI RADIASI RUANG KONTROL MESIN BERKAS ELEKTRON 350 keV/ 20 mA

**Rany Saptaaji, Sigit Haryanto, Setyo Atmojo, Sutadi, Sunardi**

*Puslitbang Teknologi Maju - Batan*

## ABSTRAK

RANCANGAN DAN KONSTRUKSI PERISAI RADIASI RUANG KONTROL MESIN BERKAS ELEKTRON 350 keV/20 mA. Telah dilakukan perancangan dan konstruksi perisai radiasi ruang kontrol mesin berkas elektron (MBE) 350 keV/20 mA. Dengan beroperasinya mesin berkas elektron, maka timbul sinar X dan gas ozon yang dapat membahayakan keselamatan dan kesehatan manusia, apabila melebihi dosis tertentu. Oleh karena itu antara ruang MBE dan ruang kontrol perlu diberi perisai radiasi demi keselamatan pekerja radiasi. Perisai radiasi berfungsi untuk menahan/mengurangi sinar X yang diterima pekerja radiasi. Pembuatan perisai radiasi ini meliputi penentuan rancangan bentuk, dimensi, bahan, gambar kerja dan konstruksi. Perisai radiasi penutup pintu antara ruang MBE dan ruang kontrol dibuat dari balok beton bersusun dengan tebal beton minimum 44,069 cm. Sebagai penguat dipasang sabuk dari besi strip agar balok beton tidak mudah tergeser atau roboh. Ketebalan perisai radiasi yang telah dikonstruksi sudah memenuhi syarat sebagai perisai radiasi apabila batas laju dosis yang diijinkan 2,5 mrem/jam. Dari hasil pengujian diketahui bahwa besarnya laju dosis di ruang kontrol 0,03 mrem/jam, pada kondisi MBE beroperasi dengan tegangan 340 kV, arus berkas 4,4 mA.

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

## ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE CONTROL ROOM RADIATION SHIELDING FOR THE ELECTRON BEAM MACHINE (EBM) 350 keV/20 mA. Design and construction of the control room radiation shielding for the electron beam machine 350 keV/20 mA has been done. When electron beam machine is in operation, the X rays and ozon will be produced. It is a dangerous for healthy and personal safety, when the radiation dose greater than permissible dose. Therefore between the control room and EBM room necessary to be constructed a radiation shielding to safety the radiation personel. The function of radiation shielding is to shield or to reduce X rays. This research consist of determination of the dimension, material, drawing and construction of radiation shielding. The radiation shielding between control room and EBM room is constructed with stack of concret block and has minimum thicknees of 44,069 cm. In order to the radiation shielding is not shift or overthrow necessary to install band iron to bind it. The thickness of radiation shielding which constructed is satisfied to safety if the permissible dose rate of 2.5 mrem/hour. The experiment result shows that the dose rate is 0.03 mrem/hour in control room, when the EBM is operated in 340 kV of voltage and 4.4 mA of beam current.

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

## PENDAHULUAN

**S**alah satu program BATAN adalah membangun mesin berkas elektron (MBE) yang pelaksanaannya dikerjakan di Bidang Akselerator P3TM-BATAN Yogyakarta. Sesuai rencana MBE ditempatkan pada salah satu ruangan yang sudah mempunyai perisai radiasi berupa dinding beton dengan ketebalan antara 45 sampai 100 cm. Namun diantara ruang MBE dengan ruang kontrol terdapat sebuah pintu penghubung. Apabila

MBE beroperasi akan timbul sinar X dan gas ozon yang dapat masuk ke ruang kontrol melalui pintu tersebut. Hal ini tidak diinginkan karena sinar X maupun gas ozon dapat mengganggu kesehatan maupun keselamatan manusia apabila dosisnya berlebihan. Sinar X timbul akibat interaksi antara berkas elektron dengan materi yang diradiasi maupun dengan bahan penutup berkas (*beam stopper*). Sedangkan gas ozon timbul akibat interaksi berkas elektron dengan udara yang dilewati berkas tersebut.

Berdasarkan hal tersebut maka perlu dibuat perisai radiasi untuk menutup pintu penghubung antara ruang MBE dengan ruang kontrol. Perisai radiasi ini dibuat dari beton bersusun dengan tujuan apabila suatu saat pintu tersebut akan difungsikan kembali maka perisai tersebut mudah dibongkar. Perisai radiasi yang dibuat sebagian besar merupakan konstruksi mekanik yang berfungsi untuk menahan/mengurangi radiasi sinar X dan gas ozon yang timbul akibat beroperasinya MBE, sehingga tidak membahayakan bagi orang yang bekerja di ruang kontrol MBE. Ketebalan perisai radiasi dirancang berdasarkan pada besarnya energi dan arus berkas elektron maksimum yang dihasilkan oleh MBE.

## 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 dan 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. Karena hal tersebut maka proteksi radiasi mempunyai filosofi dasar adanya asas manfaat, asas optimasi dan asas limitasi. Untuk

sumber radiasi yang mempunyai potensi bahaya eksternal, penerimaan radiasai dapat dikurangi dengan pengendalian sebagai berikut: pembatasan jangka waktu kerja pada daerah medan radiasi, pembatasan jarak terhadap sumber radiasi, dan penggunaan perisai radiasi

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 (Nilai Batas Dosis). Pemakaian perisai radiasi di ruang MBE merupakan salah satu syarat mutlak dalam pengopersaian MBE, guna melindungi pekerja dari bahaya radiasi sinar X. Prinsip perisai radiasi adalah mengurangi fluks radiasi di balik perisai. Pengurangan ini dapat terjadi karena terjadinya interaksi antara radiasi dengan bahan perisai. Dalam kaitannya dengan bahan perisai untuk radiasi sinar X, umumnya dipakai bahan yang mempunyai densitas tinggi seperti beton dan timbal, karena bahan tersebut cukup efektif untuk menyerap radiasi gamma dan sinar X<sup>[1]</sup>. 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 ruang MBE harus  $\leq 25 \mu\text{Sv/jam}$  (2,5 mrem/jam). Namun untuk perkembangan nantinya sesuai dengan rekomendasi ICRP No. 60 tahun 1990 nilai batas dosis (NBD) akan ditekan menjadi 20 mSv/tahun atau 10  $\mu\text{Sv/jam}$  (1 mrem/jam)<sup>[2]</sup>. Agar nilai batas dosis tersebut tercapai, maka ketebalan perisai radiasi ditentukan berdasarkan rumus sebagai berikut<sup>[3]</sup>:

$$H_m \leq \frac{D_0 B_x T}{(1,67 \times 10^{-5}) d^2} \quad (1)$$

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

dengan :

$B_x$  = rasio transmisi perisai untuk sinar X.

$H_m$  = batas laju dosis maksimum yang digunakan (mrem jam<sup>-1</sup>).

$D$  = 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 (rads m<sup>2</sup> menit<sup>-1</sup>)

$T$  = faktor pemakaian

$$n = \log(1/B_x) \quad (3)$$

dengan :

$n$  = banyaknya TVL

TVL = Tenth Value Layer

Sehingga tebal perisai radiasi dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$S = Ti + (n - 1) Te \quad (4)$$

dengan :

$Ti$  = TVL pertama yang langsung berhadapan dengan sumber

$Te$  = TVL berikutnya (setelah  $Ti$ )

$S$  = tebal perisai

Untuk lebih amannya tebal perisai radiasi ( $S$ ) direkomendasikan untuk ditambah 1 Half Value Layer (HVL)<sup>[4]</sup>. Sedangkan harga  $D_o$ ,  $Ti$ ,  $Te$  dan HVL dapat diperoleh dengan cara melihat/membaca kurva pada Gambar 4, 5, 6 dan Tabel 2 terlampir.  $D_o$  dapat dihitung dengan membaca kurva pada Gambar 4.  $Ti$  dan  $Te$  dapat dihitung dengan membaca kurva pada Gambar 5 dan 6. Sedangkan HVL dapat dilihat pada Tabel 2. Dari beberapa

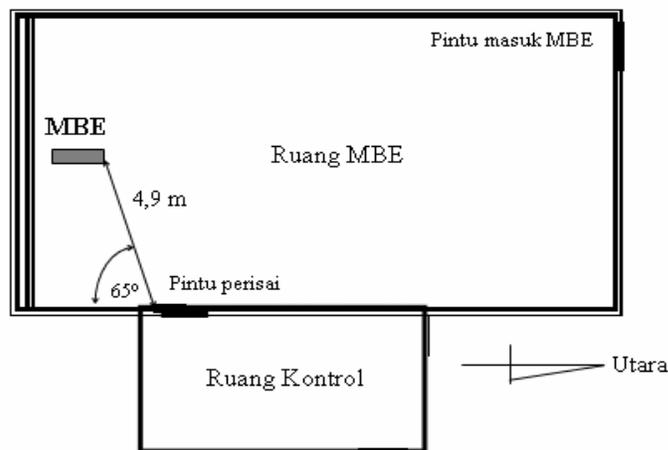
rumusan diatas diharapkan dapat memberikan pertimbangan rancangan yang lebih terinci serta pembuatan perisai radiasi yang lebih baik.

## TATA KERJA DAN PEMBAHASAN

Di dalam pembuatan rancangan perisai radiasi untuk ruang kontrol MBE ada beberapa hal yang menjadi pertimbangan supaya dapat berfungsi dengan baik antara lain :

1. Perisai radiasi harus mampu menahan radiasi sinar X dan gas ozon yang ditimbulkan oleh MBE, sehingga orang yang bekerja di luar ruang MBE tetap aman selama berlangsungnya operasi MBE.
2. Perisai radiasi dibuat dari bahan beton, karena bahan beton cukup efektif untuk menyerap radiasi sinar X<sup>[1]</sup>.

Berdasarkan pertimbangan tersebut di atas, maka perisai radiasi dibuat dari bahan beton dengan ketebalan tertentu, sehingga mampu menahan sinar X dan gas ozon yang timbul akibat beroperasinya MBE pada daya maksimal. Perisai radiasi dibuat dari bahan beton dengan  $\rho = 2,35.10^3 \text{ kg/m}^3$ . Ketebalan perisai radiasi dirancang agar pekerja radiasi tidak melebihi batas laju dosis yang diijinkan yaitu 2,5 mrem/jam.



Gambar 1. Skema perisai radiasi ruang kontrol MBE.

### Perhitungan Tebal Perisai Radiasi

Mesin Berkas Elektron 350 keV/20 mA, dengan  $E = 350 \text{ keV}$ ,  $I = 20 \text{ mA}$ ,  $d(90^\circ) = 4,9 \text{ m}$  (lihat Gambar 1.),  $T = 1$ ,  $H_m = 2,5 \text{ mrem/jam}$ .

Perhitungan indeks laju dosis serap pada jarak 4,9 m dari sumber radiasi sinar X sebagai berikut :

Dari kurva pada Gambar 4 diperoleh :

$$Do(90^\circ, W) = 4 \text{ rad m}^2 \text{ mA}^{-1} \text{ min}^{-1}$$

Untuk arus berkas = 20 mA, maka:

$$\begin{aligned} Do(90^\circ, W) &= 20 \times 4 \text{ rad m}^2 \text{ min}^{-1} \\ &= 80 \text{ rad m}^2 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

Karena berkas elektron berinteraksi dengan *beam stopper* yang terbuat dari aluminium, maka besarnya laju dosis (*Do*) dapat dihitung sebagai berikut :<sup>[3]</sup>

$$Do(90^\circ, Al)/Do(90^\circ, W) = 0,3 \quad W = \text{Tungsten}$$

$$Do(90^\circ, Al) = 0,3 \times Do(90^\circ, W) \quad Al = \text{Aluminium}$$

$$\begin{aligned} Do(90^\circ, Al) &= 0,3 \times 80 \text{ rad m}^2 \text{ min}^{-1} \\ &= 24 \text{ rad m}^2 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

Menghitung  $B_x$  pada arah  $90^\circ$  terhadap arah berkas elektron menggunakan persamaan (2):

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

$$B_x = (1,67 \times 10^{-5}) \left[ \frac{2,5 \times (4,9)^2}{24 \times 1} \right]$$

$$B_x = 4,177 \times 10^{-5}$$

$$\begin{aligned} n &= \log(1/B_x) \quad n = \text{banyaknya TVL} \\ &= \log(1/4,177 \cdot 10^{-5}) = 4,379 \end{aligned}$$

Dari kurva pada Gambar 5 dan 6 diperoleh:

$$Ti = 4,9 \text{ inci} = 12,446 \text{ cm} \quad Ti = \text{TVL pertama yang menghadap sumber}$$

$$Te = 3,3 \text{ inci} = 8,382 \text{ cm} \quad Te = \text{TVL berikutnya (setelah Ti)}$$

Dengan menggunakan persamaan 4, dapat dihitung besarnya tebal perisai radiasi (*S*) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} &= Ti + (n - 1) Te \quad S = \text{tebal perisai radiasi} \\ &= 12,446 + (4,379 - 1) 8,382 \\ &= 40,769 \text{ cm} \end{aligned}$$

Rekomendasi :  $S' = S + HVL$   $HVL$  beton pada  $E = 350 \text{ keV} = 3,3 \text{ cm}$ .<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} S' &= 40,769 + 3,3 \\ &= 44,069 \text{ cm} \end{aligned}$$

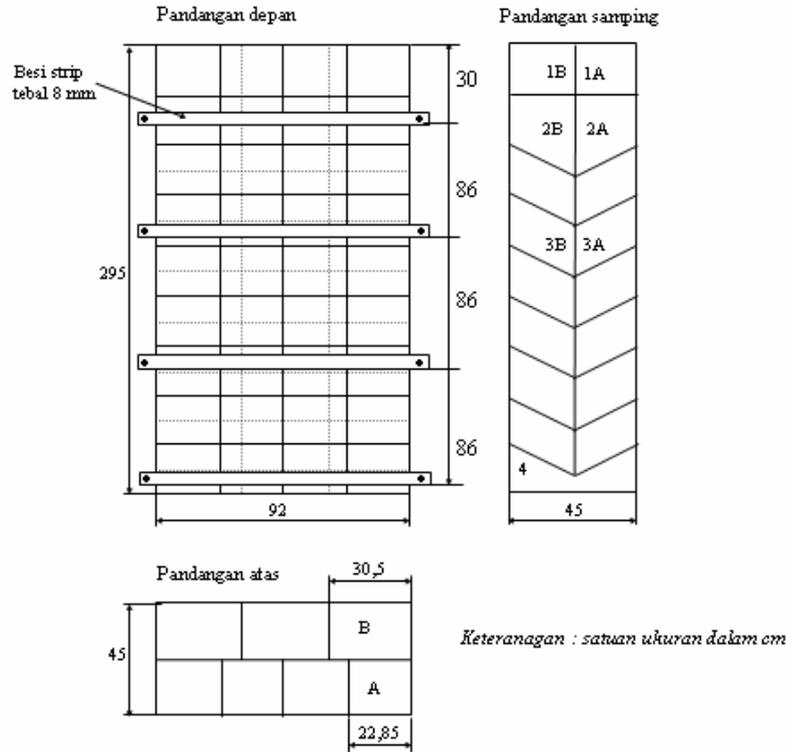
Jadi tebal perisai radiasi pada jarak 4,9 m dari sumber adalah 44,069 cm, dengan bahan dari beton normal  $\rho = 2,35 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

Dari hasil perhitungan diperoleh ketebalan perisai radiasi 44,069 cm, namun dalam konstruksinya dibuat 45 cm. Perisai radiasi ini dibuat dari susunan balok beton dengan tujuan apabila suatu saat pintu tersebut akan difungsikan kembali maka perisai tersebut mudah dibongkar. Sambungan antar balok beton dibuat miring dan dalam pemasangannya dibuat zig-zag, dengan tujuan agar berkas sinar X yang menabrak perisai radiasi tidak dapat langsung melewati sela-sela sambungan antara balok beton, seperti terlihat pada Gambar 2. Kalau dilihat posisi dinding pintu masuk yang akan ditutup tidak langsung membentuk garis lurus terhadap sinar X yang datang melainkan membentuk sudut  $65^\circ$  (lihat Gambar 1), sehingga diharapkan sinar X tidak dapat langsung melewati sela-sela antara dinding dan balok beton yang dipasang, karena pada dasarnya sinar X tidak dapat berbelok tanpa ada pengaruh dari luar.

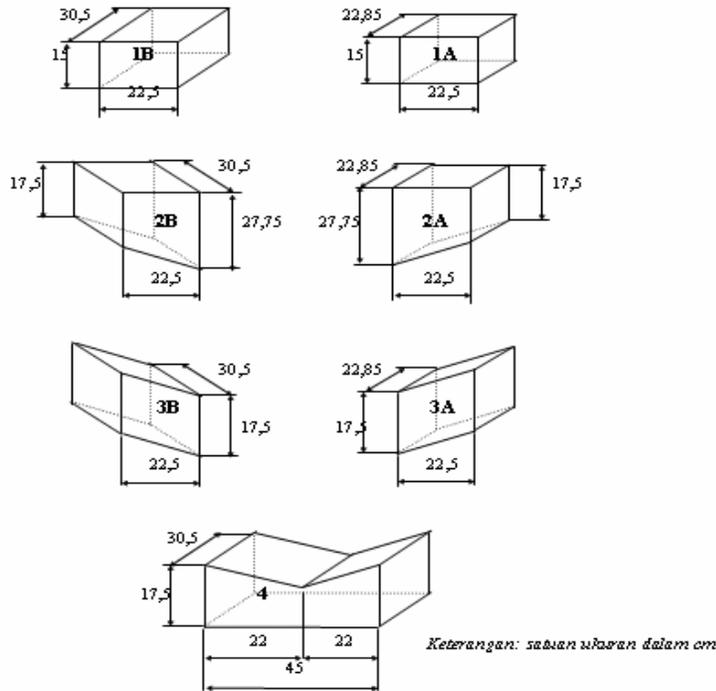
Dalam pemasangannya balok beton disusun hingga menutup seluruh pintu dan pada bagian yang bersinggungan dengan dinding ditutup dengan semen dan pasir guna menahan gas ozon yang mungkin masuk melewati sela-sela. Sedangkan pada permukaan luar perisai radiasi (balok beton bersusun) dipasang bata merah dan diplester dengan semen dan pasir dengan tujuan sebagai penahan gas ozon. Sebelum permukaan susunan balok beton diplester, pada jarak tertentu diberi penguat dari besi strip tebal 8 mm yang diikat dengan dinding menggunakan *dyna bolt*  $\phi$  6 mm, dengan tujuan agar balok beton tidak mudah roboh atau bergeser apabila ada gerakan (goncangan) akibat gempa bumi.

**Tabel 1. Tebal perisai beton.**

No.	Energi (keV)	Jarak (m)	Indeks laju dosis terserap pada jarak 1 m dari sumber (rads m <sup>2</sup> min <sup>-1</sup> )	Tebal perisai beton (cm)	
				Laju dosis maksimal 2,5 m rem/jam	Laju dosis maksimal 1 m rem/jam
1.	350	4,9	24	44,069	47,406



**Gambar 2. Konstruksi balok beton perisai radiasi ruang kontrol MBE.**



**Gambar 3. Balok beton perisai radiasi ruang kontrol MBE.**

Setelah dilakukan pengujian dengan cara mengoperasikan MBE pada tegangan 340 kV dan arus berkas 4,4 mA (tegangan dan arus berkas maksimum yang dapat dicapai pada saat itu), dan kemudian dilakukan pengukuran laju dosis paparan radiasi di ruang kontrol, diperoleh besar laju dosis paparan radiasi sinar X sebesar 0,03 mrem/jam, besar laju dosis ini sama dengan laju dosis latar. Sedangkan gas ozon yang dihasilkan tetap terkungkung di dalam ruang MBE.

Dari Tabel 1 dan Gambar 1, dapat dilihat untuk laju batas dosis maksimum yang diijinkan 2,5 mrem/jam (laju batas dosis yang berlaku untuk pekerja radiasi pada saat ini), maka ketebalan perisai radiasi ruang kontrol MBE sudah memenuhi syarat. Namun untuk perkembangan nantinya sesuai dengan rekomendasi ICRP No. 60 tahun 1990, nilai batas dosis (NBD) akan ditekan menjadi 1 mrem/jam, maka ketebalan perisai radiasi ruang kontrol MBE masih perlu ditambah 3,337 cm.

**KESIMPULAN**

Pembuatan perisai radiasi ini meliputi penentuan rancangan bentuk, dimensi, bahan,

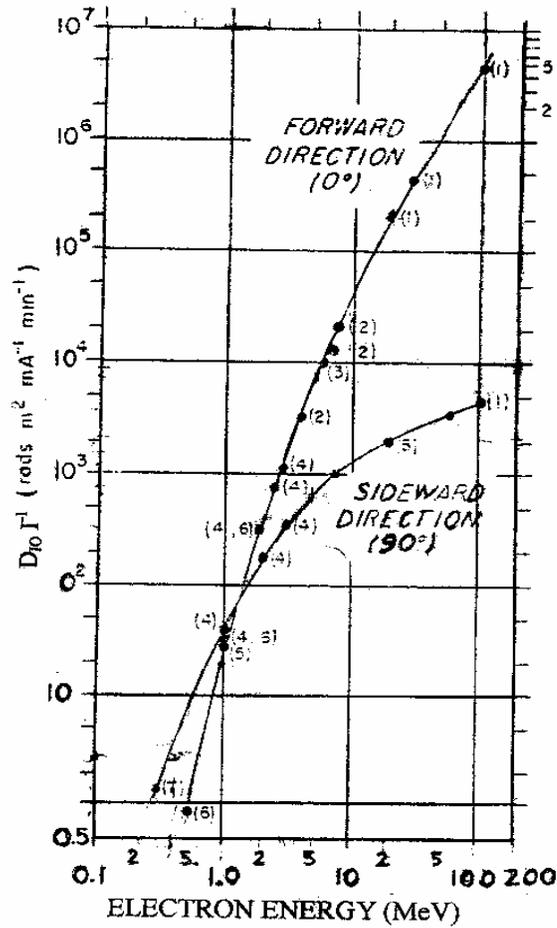
gambar kerja dan konstruksi. Perisai radiasi penutup pintu antara ruang MBE dan ruang kontrol MBE dibuat dari balok beton bersusun dengan tebal beton minimum 44,069 cm. Ketebalan perisai radiasi yang telah dikonstruksi sudah memenuhi syarat sebagai perisai radiasi apabila batas laju dosis yang diijinkan 2,5 m rem/jam. Dari hasil pengujian diketahui bahwa besarnya laju dosis di ruang kontrol 0,03 mrem/jam, pada kondisi MBE beroperasi dengan tegangan 340 kV, arus berkas 4,4 mA.

**DAFTAR PUSTAKA**

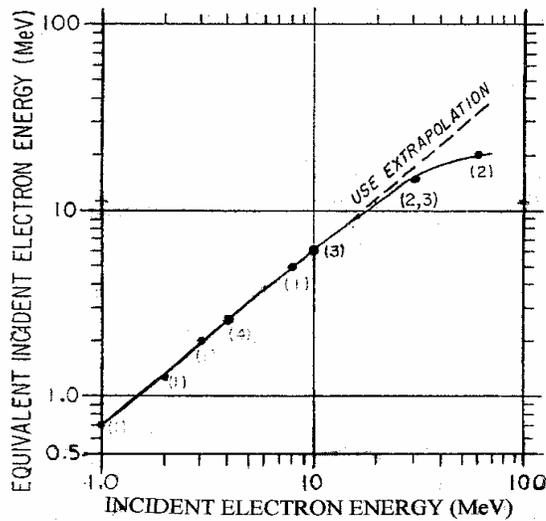
- [1] SUWARNO WIRYOSIMIN, *Mengenal Asas Proteksi Radiasi*, Penerbit ITB Bandung, 1995.
- [2] ANNALS OF THE ICRP, *Recommendations of The International Commission on Radiological Protection*, 1990.
- [3] NCRP Report No. 51, *Radiation Protection Design Guidelines for 0.1 – 100 MeV Particle Accelerator Facilities*, Issued, March 1977.
- [4] BATAN-JAERI, *Radiation Shielding Design For X-Ray Room*, Training Course on Radiation Protection, Jakarta,

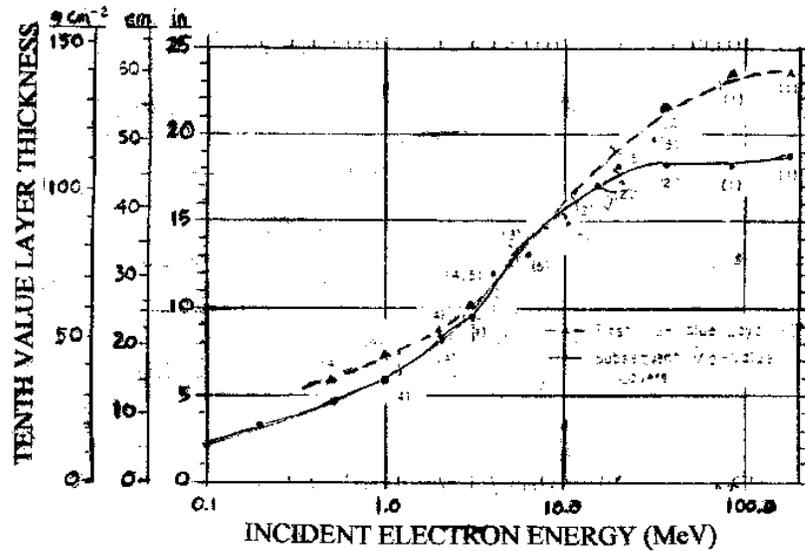
**LAMPIRAN****Tabel 2. Half-Value and Tenth-Value Layers<sup>[4]</sup>.**

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. X-Ray Emission Rates from High-Z Targets<sup>[3]</sup>.



Gambar 5. Equivalent Incident Electron Energies<sup>[3]</sup>.Gambar 6. Dose-Equivalent Index Tenth-Value Layers for Broad Beam X-Rays in Concrete<sup>[3]</sup>.

## TANYA JAWAB

**Eko Priyono**

- Apakah besarnya energi elektron akan mempengaruhi besarnya energi sinar X yang ditimbulkan dan ketebalan perisai radiasi yang diperlukan?

**Rany S.**

- Sinar X mempunyai energi paling besar sama dengan energi kinetik elektron pada waktu terjadinya perlambatan oleh pengaruh gaya inti atom. Sehingga kebolehjadian semakin besar energi elektron akan semakin besar pula energi sinar X. Dengan demikian semakin besar energi sinar X akan diperlukan ketebalan perisai radiasi yang semakin tebal.