

SIMULASI DESAIN PERISAI RADIASI MBE-LATEKS MENGGUNAKAN MCNP5

SIMULATION FOR RADIATION SHIELDING DESIGN OF EBM-LATEX USING MCNP5

Darsono

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281,
e-mail: b_darsono@batan.go.id

Safirudin, M.Toifur

Fakultas Pasca Sarjana, Universitas Ahmad Dahlan
Jl.Pramuka 42, Sidikan, Yogyakarta 55161

Diterima 10 Mei 2013, diterima dalam bentuk perbaikan 23 Mei 2013, disetujui 03 Juni 2012

ABSTRAK

SIMULASI DESAIN PERISAI RADIASI MBE-LATEKS MENGGUNAKAN MCNP5. Telah dilakukan simulasi desain perisai radiasi MBE lateks 300 keV/20 mA menggunakan program MCNP5. Simulasi dilakukan untuk memperoleh data verifikasi desain perisai radiasi MBE lateks secara analitik. Dalam simulasi menggunakan program MCNP5 dibutuhkan masukan yang tepat agar memberikan hasil yang diharapkan. Masukan itu berupa bentuk dan intensitas sumber radiasi sinar X yang digunakan, bentuk geometri perisai radiasi dan komponen MBE lateks di dalam perisai, dan jenis bahan perisai dan komponen MBE lateks yang digunakan. Masukan tersebut kemudian dimodelkan menggunakan program VISED. Dalam simulasi ini sumber radiasi sinar X dimodelkan berbentuk segi empat tipis berada ditengah-tengah jendela Ti yang memancarkan radiasi secara isotropik. Selain itu komponen MBE lateks di dalam perisai dipandang sebagai pengganggu pancaran sumber radiasi X. Pengamatan intensitas teratenuasi dideteksi menggunakan 5 detektor titik talli (Tally) F5 yang diletakkan searah tebal perisai radiasi. Pengamatan distribusi sinar X pada perisai dideteksi dengan meletakkan banyak detektor pada permukaan bagian luar perisai. Dari hasil simulasi dan analisis data, diperoleh nilai tebal perisai Pb yang aman untuk menahan paparan radiasi MBE lateks 300 keV/20 mA yaitu > 2,5 cm. Di samping data tebal perisai, pada simulasi ini juga diperoleh nilai laju dosis pada berbagai permukaan perisai. Besar nilai laju dosis pada permukaan perisai bidang XZ sebesar 2,58 mrem/jam, dan pada permukaan perisai bidang YZ sebesar 2,88 mrem/jam. Perbedaan laju dosis ini disebabkan oleh pengaruh letak komponen MBE yang berada di dalam perisai radiasi sinar X.

Kata kunci : Perisai radiasi sinar X, MCNP, MBE

ABSTRACT

SIMULATION FOR RADIATION SHIELDING DESIGN OF EBM-LATEX USING MCNP5. Radiation shielding design for EBM-Latex 300 keV/20 mA was simulated using MCNP5. The purpose of simulation is to obtain verification data through analytical radiation shielding design of EBM-latex. In MCNP5 simulation, it needs the accurate input in order to provide the best outcome. The inputs are the size and intensity of X-rays source, the geometry of radiation shielding and EBM component inside the shielding, the characteristics of the material being simulated. The input is to be modeled using the VISED (visual editor) programme. In this simulation the X-ray radiation source is in the form of thin square source which is located in the central of Ti window and emits radiation isotropically. Furthermore, the EBM components inside the radiation shielding is as disturbance of the emitting X-ray when it is traveling. The observed attenuation intensity is detected using 5 point detector of Tally F5 which is placed in direction of the thickness of Pb-shielding. The observed X-ray distribution on the surface of a certain shielding is detected by placing many detectors F5 on its outer surface. From the results of simulation and data analysis, it is obtained that the safety thickness value of Pb shielding in order to restrain the radiation exposure from EBM-Latex 300 keV/20 mA is higher than 2,5 cm. In addition to the data of the shielding thickness value, the simulation results also shows the index dosis rate on shielding surfaces. The index dosis rate on the shield surface of the XZ plane is 2,58 mrem/h and on the shield surface of the YZ plane is 2,88 mrem/h. The different value between the two shield surfaces is due to the effect of the placement position of EBM components in the X-rays radition shielding.

Keyword: MCNP, X-ray radiation shielding, EBM-latex

PENDAHULUAN

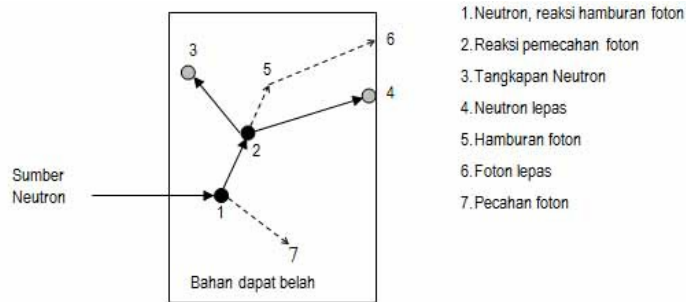
Salah satu program BATAN adalah membangun mesin berkas elektron (MBE) 300 keV/20 mA untuk iradiasi lateks karet alam⁽¹⁾. Pada umumnya MBE ditempatkan dalam sebuah ruangan khusus dan tertutup, namun dalam perkembangannya MBE lateks hasil karya BATAN Yogyakarta dibuat terbuka dan langsung berinteraksi dengan personil (pekerja). Oleh karena itu, fungsi perisai radiasi menjadi sangat penting dalam memberikan keselamatan bagi operator maupun lingkungan dari bahaya sinar X pada pengoperasian MBE. 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 (*controlled area*) tidak melebihi 25 $\mu\text{Sv/jam}$ (2,5 mrem/jam). Tebal perisai Pb (timbal) didesain menggunakan perhitungan secara analitik dengan menggunakan beberapa asumsi⁽²⁾, dan telah direview aspek perhitungannya namun belum dilakukan verifikasi secara eksperimen. Dalam hal desain perisai radiasi MBE lateks 300 keV/20 mA karya PTAPB – BATAN Yogyakarta memiliki keterbatasan yaitu tidak bisa dilakukan verifikasi desain perisai secara eksperimen karena tidak ada sinar X standar orde 300 keV sesuai spesifikasi MBE lateks. Mengingat faktor keamanan manusia merupakan hal yang sangat penting dalam instalasi perangkat nuklir maka verifikasi desain perisai radiasi sinar X untuk MBE urgen untuk dilakukan. Apalagi rancang bangun MBE *self-shielding* ini merupakan yang pertama kali dilakukan di BATAN sehingga belum mempunyai pengalaman empirik dalam mendesain perisai radiasi sinar X ini. Oleh karena kendala di atas maka pada penelitian ini akan dilakukan suatu simulasi atau pemodelan desain perisai radiasi menggunakan metode Monte Carlo dengan salah satu program komputernya yaitu MCNP5 (*Monte Carlo N-Particle version 5*). Program komputer MCNP5 adalah alternatif yang sangat baik untuk menyelesaikan masalah desain perisai radiasi sinar X^(3,4). Hosain, dkk menggunakan MCNP untuk studi watak perisai berlapis yang mengandung poly-Boron dan *Ilmenite magnetite concrete*⁽⁵⁾, Mowlavi, menggunakan MCNP untuk menghitung spektrum sinar X untuk berbagai target⁽⁶⁾, dan Fu Shen, dkk., mempelajari efek perisai bentuk larutan Zinc Bromide menggunakan MCNP⁽⁷⁾. MCNP5 merupakan perangkat lunak komputer menggunakan metode Monte Carlo yang diaplikasikan untuk menghitung perjalanan partikel yaitu neutron, foton, dan elektron. Perangkat lunak ini dikerjakan oleh tim monte carlo X-5 dari Laboratorium Nasional Los Alamos, USA. Metode Monte Carlo merupakan metode numerik statistik yang digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah dengan mensimulasikan bilangan acak untuk masalah-masalah yang tidak mungkin diselesaikan secara analitik. Pada simulasi MCNP ini diperlukan masukan (*input*) geometri yang terdiri dari *cell card*, *surface card*, *material card*, dan *tally* yang menggambarkan masalah yang akan disimulasi. Ketepatan pembuatan masukan geometri dan data nuklir menentukan keberhasilan dari simulasi MCNP.

METODOLOGI

Metode MCNP sebagai sebuah teknik simulasi transport partikel yang termasuk dalam teknik eksperimentasi teoritis. Terlihat dari penelusuran jejak partikel (misal neutron) yang dilakukan MCNP dari sebuah sumber sampai neutron itu dianggap lenyap dari sistem. Secara acak akan ditentukan dengan inti apa neutron akan berinteraksi, jenis dan lokasi interaksi, arahnya, energi dan jenis partikel-partikel yang terbentuk setelah interaksi. Setelah partikel mulai bergerak keluar dari sumber lalu terbentuklah sebuah jalur dari hasil pergerakannya. Jika jalur itu terbelah menjadi 2 arah pada sebuah permukaan maka kedua jalur gerak partikel telah terbentuk sehingga sekarang sudah terdapat 2 jalur jejak partikel dari titik awal (sumber partikel). Gambar 1 memperlihatkan kebolehdjian sebuah neutron dari sebuah sumber acak di dalam sebuah lempeng material yang mengalami reaksi pembelahan. Dari luar (sumber), neutron yang menembus materi sampai pada posisi (1), merupakan posisi acak yang dipilih sebagai tempat interaksi mula-mula antar neutron dengan materi. Interaksi yang terjadi adalah hamburan tak lenting ($n,2n$), foton yang terbentuk diabaikan terlebih dulu untuk analisis lebih lanjut.

Neutron mengalami reaksi pembelahan (2), menghasilkan 2 buah neutron baru dan sebuah foton. Salah satu neutron hasil pembelahan (3) ditangkap oleh material lalu berhenti. Neutron yang lain (4) secara acak bergerak keluar materi. Foton hasil pembelahan (5) mengalami peristiwa tumbukan dengan materi lalu secara acak bergerak keluar lempeng materi (6). Oleh MCNP, partikel yang mengalami penundaan analisis paling akhir

akan dianalisis pertama kali sesudah penundaan. Panjang jejak *tallies* menggunakan panjang sebuah jejak di dalam sebuah sel untuk menentukan perhitungan yang kita inginkan, misalnya fluks atau deposisi energi. Jejak yang melintas permukaan digunakan untuk menghitung prakiraan fluks atau deposisi energi pada permukaan. Sedangkan jejak yang mengalami tumbukan digunakan untuk menghitung perkalian dan kekristalan (prakiraan tumbukan)⁽⁶⁾.

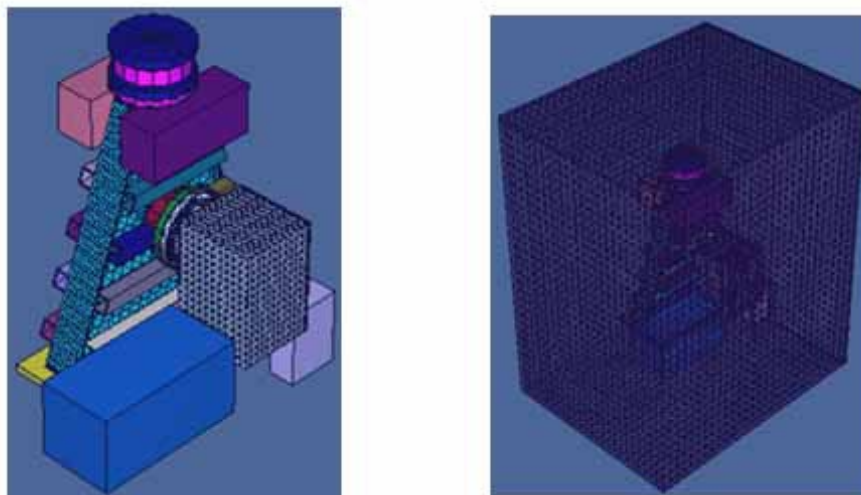


Gambar 1. Simulasi transport partikel neutron

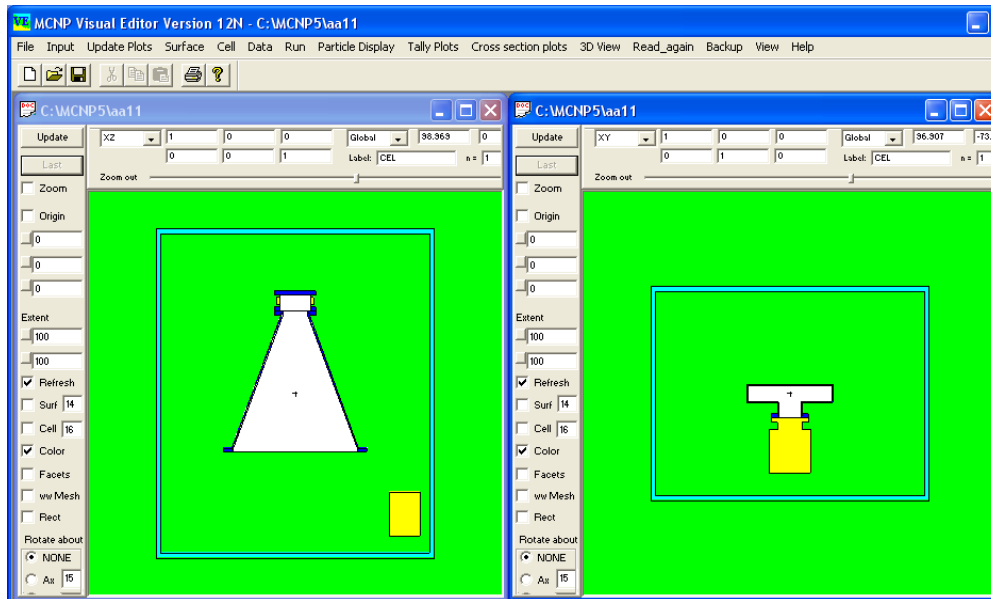
Untuk dapat melakukan simulasi desain perisai radiasi sinar X menggunakan MCNP5 dibutuhkan beberapa masukan. Masukan yang diperlukan adalah geometri komponen MBE lateks dan perisai radiasi, jenis bahan perisai dan komponen MBE lateks yang digunakan dengan hasil keluaran berupa model intensitas radiasi, dan model koefisien atenuasi.

Model Komponen MBE Lateks dan Perisai Radiasi

Hal terpenting dalam pemodelan dengan MCNP5 adalah geometri. Akurasi hasil pemodelan juga sangat ditentukan oleh kesesuaian dengan geometri obyek yang akan dimodelkan. Tahapan yang tersulit dalam pemodelan dengan MCNP5 adalah dalam pembuatan geometri obyek terutama obyek-obyek yang kompleks. Geometri MBE lateks yang dimodelkan meliputi pemfokus, *flange* pemfokus, *window* Ti, *flange window* Ti, pompa vakum, *flange* pompa, corong pemayar, penguat corong pemayar, motor pengaduk, magnet pemayar dan perisai Pb. Seluruh bagian dari MBE dimasukkan ke dalam pemodelan geometri karena semua memiliki kontribusi dalam hamburan dan penyerapan radiasi sinar X. Geometri perisai dan komponen MBE lateks yang akan dimodelkan diambil dari acuan (9), kemudian dengan menggunakan program VISED (visual editor) diperoleh tampilan tiga dimensi seperti diperlihatkan pada Gambar 2. Dimensi dan material dalam geometri MBE dibuat sebagai masukan MCNP5 dengan tampilan dalam MCNP-VISED dua dimensi diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Geometri MBE lateks 3 dimensi dalam MCNP5 Visual Editor (a) Komponen MBE lateks dan (b) Perisai radiasi dan komponen MBE lateks



Gambar 3. Geometri MBE lateks dalam MCNP Visual Editor 2 dimensi

Untuk menghitung interaksi elektron dengan atom yang terkandung di dalam komponen MBE lateks maka MCNP5 membutuhkan jenis material sebagai masukan. Material yang dimodelkan diantaranya adalah titanium, udara, besi, SS-316, dan timbal. Komposisi material MBE lateks berdasarkan fraksi berat diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi material berdasarkan fraksi berat⁽³⁾

Bahan	Densitas (gr/cm ³)	Unsur	Nomor Atom	ID MCNP5	Fraksi Berat	Fraksi Atom
SS-316	7,92	Fe	26	26000	0,655	
		Cr	24	24000	0,17	
		Ni	28	28000	0,12	
		Mo	42	42000	0,025	
		Mn	25	25000	0,02	
		Si	14	14000	0,01	
Udara	0,00124	N	7	7000		0,68691
		O	8	8000		0,30124
		C	6	6000		0,000125
		Ar	18	18000		0,011717
Timbal	11,36	Pb	82	82000		1
Titanium	4,5	Ti	22	22000		1
Besi	7,86	Fe	26	26000		1

Model Intensitas Radiasi dan Koefisien Atenuasi

Pemodelan untuk memperoleh keluaran berupa intensitas radiasi dan koefisien atenuasi linier digunakan detektor *Tally F5* untuk memberikan keluaran MCNP5 berupa nilai intensitas radiasi pada detektor yang berbentuk titik maupun cincin. Namun dikarenakan geometri MBE Lateks yang tidak simetri maka di dalam perhitungan intensitas radiasi dan koefisien atenuasi tidak digunakan *tally* detektor bentuk cincin tetapi hanya digunakan *tally* detektor bentuk titik. Formula matematik yang dilakukan MCNP5 dalam menghitung intensitas radiasi pada detektor bentuk titik diperlihatkan pada persamaan berikut:

$$F5 = \int_{E_f} dE \int_{t_f} dt \phi(\vec{r}, p, E, T) \quad (1)$$

Untuk pemodelan intensitas radiasi terhambur pada perisai, beberapa detektor titik ditempatkan di sepanjang dan sejajar sumbu Z pada permukaan perisai, dan intensitas radiasi yang diperoleh kemudian dinormalisasikan dan dibuat grafik 3 dimensi. Sedangkan untuk pemodelan koefisien teratenuasi, detektor bentuk titik ditempatkan dalam perisai dengan variasi ketebalan 0,5 cm arah tebal perisai, kemudian hasil *running* masukan program MCNP5 dianalisis dan dibuat grafik hubungan antara ketebalan perisai terhadap intensitas radiasi untuk memperoleh nilai koefisien atenuasi.

Perhitungan Nilai Laju Dosis

Untuk menentukan nilai laju dosis agar diperoleh paparan radiasi $\leq 2,5$ mrem/jam diperlukan perhitungan dengan menggunakan rumus atenuasi laju dosis serap (D) yaitu:

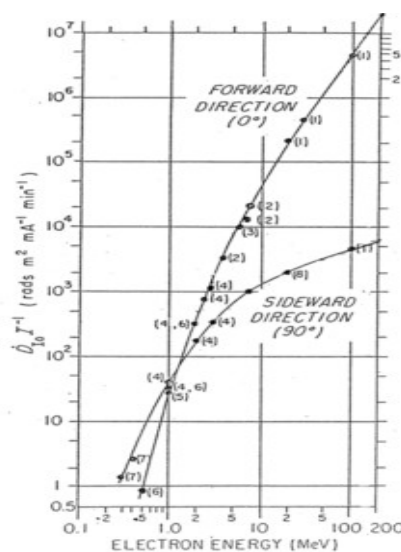
$$D = D_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

Selain menggunakan rumus pada persamaan (2) juga diperlukan data teknis MBE lateks sebagai berikut: $E = 300$ keV, $I = 20$ mA serta perhitungan indeks laju dosis serap (D_0), perhitungan indeks laju dosis terserap dilakukan dengan pengamatan kurva pada Gambar 4 berikut:

Dari kurva Gambar 4 diperoleh nilai indeks laju dosis terserap pada $E = 300$ keV adalah $1,5 \text{ rad m}^2 \text{ mA}^{-1} \text{ min}^{-1}$, oleh karena arus berkas MBE adalah 20 mA maka nilai indeks laju dosis serap (D_0) adalah $20 \text{ mA} \times 1,5 \text{ rad m}^2 \text{ mA}^{-1} \text{ min}^{-1}$ sehingga diperoleh nilai $D_0 = 30 \text{ rad m}^2/\text{min}$ atau $D_0 = 0,18 \text{ rad cm}^2/\text{jam}$. Nilai indeks laju dosis serap yang diperoleh dari kurva di atas merupakan nilai indeks laju dosis serap pada jarak 1 meter dengan luasan 1 meter persegi. Untuk memperoleh indeks laju dosis serap pada posisi sumber radiasi diletakkan dilakukan ekstrapolasi pada jarak 1-5 cm dari sumber radiasi menggunakan perbandingan kuat sumber radiasi seperti pada persamaan (3). Hal ini dilakukan karena sumber radiasi pada penelitian ini berbentuk kotak isotropik

$$\frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \quad (3)$$

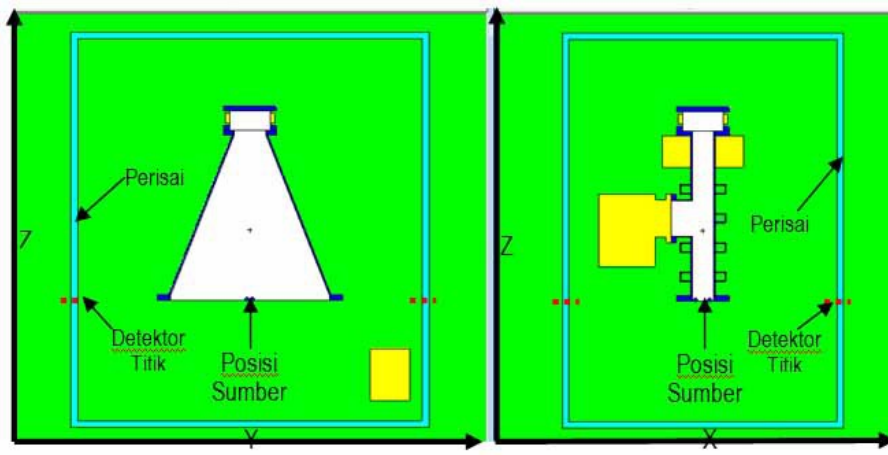
Dimana D_1 merupakan nilai indeks laju dosis acuan yaitu 0,18 rem/jam, sedangkan R_1 merupakan jarak acuan ekstrapolasi yaitu 100 cm.



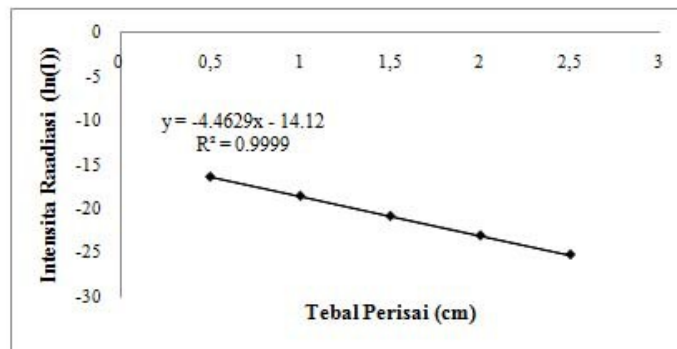
Gambar 4. Laju emisi sinar X untuk target Z berat pada NCRP Report No. 51, 1997⁽¹⁰⁾

HASIL DAN PEMBAHASAN

Masukan program MCNP5 berupa model geometri MBE lateks dan perisai, model intensitas radiasi dan model koefisien atenuasi selanjutnya di-*running* menggunakan komputer PC dengan CPU prosesor Intel Pentium IV 2 GHz dan ruang penyimpanan file *hard disk* 18 Gbytes. Hasil *running* masukan program MCNP5 menghasilkan nilai koefisien atenuasi perisai dan distribusi intensitas radiasi pada berbagai permukaan dan posisi perisai. Simulasi untuk menentukan koefisien atenuasi perisai dilakukan dengan mencacah intensitas radiasi teratenuasi pada bahan perisai. Hal ini dilakukan dengan menempatkan 5 detektor titik (*Tally F5*) jari-jari 0,005 cm pada perisai radiasi Pb dimulai pada permukaan bagian dalam (asalnya sumber sinar X) sampai bagian luar perisai dengan variasi ketebalan 0,5 cm. Model penempatan detektor diperlihatkan pada Gambar 5 dimana detektor berada pada 2 posisi tebal baik perisai bidang ZX maupun ZY, dengan penempatan posisi detektor searah tebal perasai atau tegak lurus sumbu Z



Gambar 5. Penempatan detektor titik pada permukaan XZ dan YZ



Gambar 6. Grafik hubungan antara tebal perisai dengan intensitas radiasi terattenuasi di permukaan YZ pada posisi perisai bagian kanan

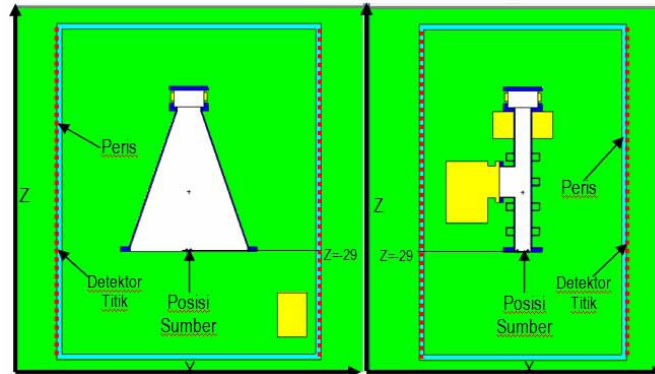
Tabel 2. Nilai koefisien atenuasi pada berbagai permukaan dan posisi perisai

No	Permukaan	Posisi dari sb-Z	Koefisien Attenuasi (cm^{-1})
1	YZ	Bagian kanan	4,4626
2	YZ	Bagian kiri	4,4308
3	XZ	Bagian kanan	4,7040
4	XZ	Bagian kiri	4,8046

Untuk mengetahui distribusi intensitas radiasi terhambur pada bahan perisai, dilakukan pemodelan dengan menempatkan detektor titik jari-jari 0,005 cm pada permukaan bagian luar perisai. Posisi pusat bidang

XZ berada pada koordinat $X = 0, Y = 67,5, Z = 0$ untuk perisai sebelah kanan pusat koordinat ($X = 0, Y = 0, Z = 0$) dan $X = 0, Y = -67,5, Z = 0$ untuk perisai sebelah kiri pusat koordinat.

Pengamatan distribusi dosis radiasi pada permukaan perisai disimulasi dengan variasi penempatan detektor titik pada jarak langkah sebesar 10 cm dari posisi pusat bidang XZ baik arah positif dan negatif sb-X dan sb-Z. Dengan cara yang sama dilakukan pengamatan distribusi dosis radiasi pada permukaan perisai radiasi untuk bidang YZ yang mempunyai posisi pusat bidang pada koordinat $X = 53, Y = 0, Z = 0$ untuk bagian kanan pusat koordinat. Model penempatan detektor titik pada permukaan XZ dan YZ untuk mengetahui distribusi dosis radiasi pada permukaan perisai radiasi diperlihatkan pada Gambar 7.

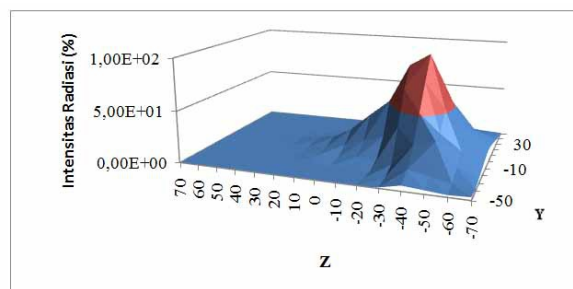


Gambar 7. Penempatan detektor titik pada permukaan bidang XZ dan YZ pada perisai bagian kiri dan kanan

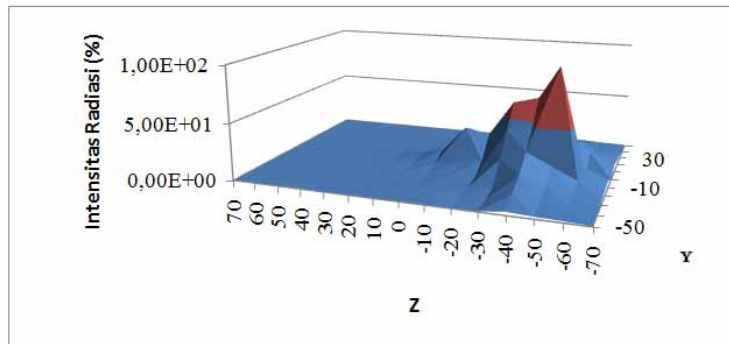
Hasil simulasi MCNP5 memberikan keluaran berupa distribusi intensitas radiasi terhambur pada permukaan YZ dan XZ. Distribusi intensitas radiasi yang terhambur pada bidang YZ bagian kiri dan kanan tidak simetri seperti contoh diperlihatkan pada Gambar 8 dan 9. Sedangkan distribusi intensitas radiasi terhambur pada bidang XZ mendekati simetri seperti diperlihatkan pada Gambar 10 dan 11.

Terlihat dari Gambar 8 sampai dengan 11 bahwa intensitas radiasi paling tinggi pada permukaan perisai terjadi pada jarak sumber radiasi dan detektor paling dekat. Dengan kata lain intensitas radiasi akan semakin menurun akibat semakin menjauh dari pusat sumber radiasi ditempatkan. Distribusi intensitas radiasi yang dihasilkan pada permukaan bidang YZ seperti yang terlihat pada Gambar 8 dan 9 tidak beraturan dan tidak simetri, hal ini disebabkan karena antara bidang YZ baik kanan dan kiri dengan sumber radiasi terdapat banyak komponen MBE yang diletakkan di dalam perisai dengan posisi komponen MBE berbeda sehingga berfungsi sebagai pengganggu hamburan sinar X.

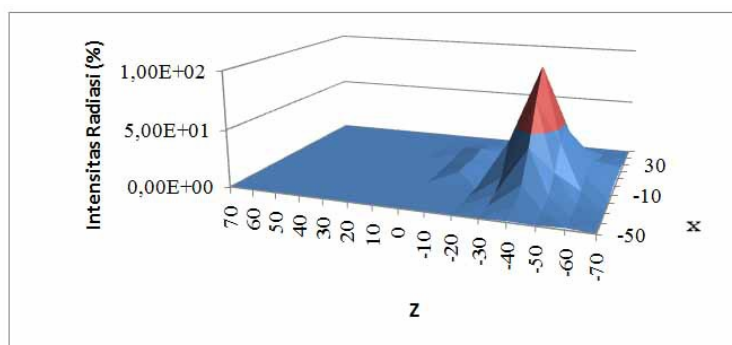
Sedangkan distribusi intensitas radiasi pada permukaan XZ sebelah kanan dan kiri seperti pada Gambar 10 dan 11 lebih beraturan dikarenakan komponen MBE lateks yang mengganggu hamburan sinar X sinar hanya bejana pemayar. Gambar 8 s/d 11 juga memperlihatkan bahwa intensitas radiasi terbesar tidak diperoleh pada permukaan koordinat $Z = -29$, dimana pada $Z = -29$ merupakan letak sumber radiasi ditempatkan, akan tetapi intensitas radiasi terbesar diperoleh pada permukaan koordinat $Z = -41$, hal ini dikarenakan pada permukaan koordinat $Z = -29$ terdapat *flange window* Ti yang tebal dan memiliki densitas $7,86 \text{ g/cm}^3$ sehingga intensitas radiasi yang dihasilkan pada permukaan $Z = -29$ lebih rendah karena teratenuasi lebih besar dibanding oleh dinding bejana pemayar.



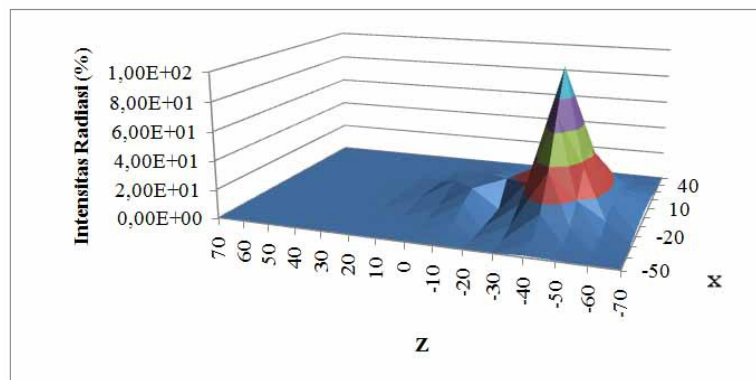
Gambar 8. Distribusi intensitas radiasi di permukaan YZ pada posisi perisai bagian kiri



Gambar 9. Distribusi intensitas radiasi di permukaan YZ pada posisi perisai bagian kanan



Gambar 10. Distribusi intensitas radiasi di permukaan XZ pada perisai sebelah kanan



Gambar 11. Distribusi intensitas radiasi di permukaan XZ pada perisai sebelah kiri

Tabel 3. Nilai paparan radiasi dan tebal perisai yang aman pada permukaan YZ bagian kanan.

Ekstrapolasi (cm)	D_0 (rem/jam)	Tebal perisai (cm)	μ (1/cm)	D_k (mrem/jam)	D_s (mrem/jam)	Keterangan
5	72	2	4,46	9,63	2,5	Tidak aman
		2,5		1,04		Aman
		3		0,11		Aman
4	113	2	4,46	15,04	2,5	Tidak aman
		2,5		1,62		Aman
		3		0,17		Aman

Ekstrapolasi (cm)	Do (rem/jam)	Tebal perisai (cm)	μ (1/cm)	Dk (mrem/jam)	Ds (mrem/jam)	Keterangan
3	200	2	4,46	26,74	2,5	Tidak aman
		2,5		2,88		Tidak aman
		3		0,31		Aman
2	450	2	4,46	60,16	2,5	Tidak aman
		2,5		6,47		Tidak aman
		3		0,70		Aman
1	1800	2	4,46	240,64	2,5	Tidak aman
		2,5		25,88		Tidak aman
		3		2,78		Tidak aman

Penentuan ketebalan perisai radiasi yang memberikan dosis radiasi pada batas aman sesuai peraturan dihitung berdasarkan data koefisiensi atenuasi linear (μ) bahan perisai secara simulasi dan besarnya nilai indeks laju dosis sumber radiasi sinar X (D_0). nilai indeks laju dosis sumber radiasi sinar X sangat tergantung dari faktor ekstrapolasi berdasarkan acuan 7 karena data nilai indeks laju dosis pada acuan 7 diukur pada jarak 1 meter dari sumber radiasi. Jadi untuk mengetahui nilai indeks laju dosis sumber radiasi pada jarak sangat dekat dengan sumber radiasi harus dilakukan ekstrapolasi sedekat mungkin, dalam hal ini dilakukan simulasi untuk jarak sumber 1-5 cm. Dari nilai laju dosis ekstrapolasi ini kemudian dilakukan perhitungan laju dosis untuk berbagai variasi tebal perisai Pb (D_k) menggunakan rumus atenuasi foton sinar X. Selanjutnya dibandingkan dengan laju dosis yang dipersyaratkan (D_s) oleh BAPETEN untuk menentukan aman tidaknya tebal perisai radiasi. Dari hasil perhitungan dan analisis data diperoleh nilai paparan radiasi dan tebal perisai yang aman pada berbagai permukaan dan posisi perisai seperti terlihat pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 4. Nilai paparan radiasi dan tebal perisai yang aman pada permukaan XZ bagian kanan

Ekstrapolasi (cm)	Do (rem/jam)	Tebal perisai (cm)	μ (1/cm)	D_k (mrem/jam)	Ds (mrem/jam)	Keterangan
5	72	2	4,7	5,96	2,5	Tidak aman
		2,5		0,57		Aman
		3		0,05		Aman
4	113	2	4,7	9,31	2,5	Tidak aman
		2,5		0,89		Aman
		3		0,08		Aman
3	200	2	4,7	16,54	2,5	Tidak aman
		2,5		2,58		Tidak aman
		3		0,15		Aman
2	450	2	4,7	37,23	2,5	Tidak aman
		2,5		3,55		Tidak aman
		3		0,34		Aman
1	1800	2	4,7	148,90	2,5	Tidak aman
		2,5		14,20		Tidak aman
		3		1,35		Aman

Dari hasil ekstrapolasi indeks laju dosis pada jarak 1-5 cm pada Tabel 3 dan 4, terlihat bahwa ekstrapolasi indeks laju dosis (D_0) pada jarak 3 cm cukup relevan digunakan sebagai standar acuan untuk penempatan posisi indeks laju dosis (D_0). Posisi D_0 pada jarak 3 cm tidak terlalu jauh dan tidak pula terlalu dekat dari posisi sumber radiasi ditempatkan. Dari indeks laju dosis D_0 pada jarak 3 cm dari sumber radiasi, dapat digunakan untuk

menentukan nilai laju dosis serap pada berbagai permukaan perisai radiasi. Besarnya laju dosis bidang XZ maupun YZ untuk tebal perisai 2,5 cm masing-masing adalah 2,58 mrem/jam dan 2,88 mrem/jam. Dari tabel di atas juga dapat dilihat bahwa tebal perisai yang efektif untuk menghasilkan paparan laju dosis $\leq 2,5$ mrem/jam adalah $>2,5$ cm, karena tebal perisai di bawah 2,5 cm menghasilkan paparan laju dosis serap melebihi paparan laju dosis yang telah ditentukan oleh BAPETEN. Ketebalan perisai yang diperoleh dari hasil simulasi dengan program MCNP5 mendekati hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan secara analitik yaitu 2,38 cm.

KESIMPULAN

Program MCNP5 dapat digunakan secara baik untuk simulasi desain perisai radiasi pada MBE lateks. Dari hasil simulasi dan analisis data, diperoleh nilai tebal perisai yang aman untuk menahan paparan radiasi MBE lateks yaitu $\geq 2,5$ cm. Di samping data tebal perisai, pada simulasi ini juga diperoleh distribusi laju dosis pada berbagai permukaan perisai. Untuk tebal perisai radiasi 2,5 cm maka besar nilai laju dosis pada permukaan perisai bidang XZ sebesar 2,58 mrem/jam, dan pada permukaan perisai bidang YZ sebesar 2,88 mrem/jam. Perbedaan laju dosis ini disebabkan oleh pengaruh letak komponen MBE yang berada di dalam perisai radiasi sinar X.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Sdr. Sukidi yang telah memberi gambar Autocad MBE-lateks 3 dimensi sehingga membantu mempermudah penggambaran pada program VISED, juga kami sampaikan ucapan terima kasih kepada Sdr. Suhartono yang telah membantu mengukur dimensi MBE-lateks yang sesungguhnya yang sangat berguna dalam simulasi MCNP.

DAFTAR PUSTAKA

- DARSONO, dkk., *Pengembangan dan Rancangbangun Mesin Berkas Elektron*, LAPTEK-PTAPB, BATAN Yogyakarta, (2010)
- RANY SAPTA AJI, *Rancangan Detail Perisai Radiasi MBE-Lateks, Dokumen Rancangan Detail MBE 300 kV/20mA*, PTAPB-BATAN, (2006)
- HARMON CHARLES D., et.al, "*Criticality Calculations with MCNPTM*", A Primer, LA-12827-M, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, (1994).
- RASITO T., "<http://rasitotursinah.wordpress.com/tools/mcnp5/mcnp5/>" diakses tanggal 3 Maret (2011)
- HOSAIN, M.S., et.al, *Indian Journal of Pure & Applied Physics* Vol. 48 (2010) 860-868
- MOULAVI, A.A, *Iran.J. Radiat.Res*, 3(3) (2005) 129-133
- FU SHEN, et.al, *Application of MCNP to Study the shielding Effect of Zinc Bromide Solution*, *Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol. 1 (2011) 98-101
- BREISMEISTER, JUDITH F., *Manual MCNP Version 4B-A General Monte Carlo N-particle Transport Code*, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, (1997)
- DARSONO, *Konsepsual Desain MBE 300KeV/20mA Untuk Industri Lateks*, Puslitbang Teknologi maju BATAN, Yogyakarta, (2006).
- NCRP Report No. 51, *Radiation Protection Design Guidenlines for 0,1 – 100 MeV Particle Accelerator Facilities*, Issued March, (1997)