

KAJIAN EKUIVALENSI KACA TIMBAL DENGAN TIMBAL MURNI MENGUNAKAN MONTE CARLO

jos Sulistyono, Wiranto Budi Santoso, Fitri Surya Ningsih, Fitri Lucyana
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir – BATAN
Gedung 71 Kawasan PUSPISTEK Serpong, Tangerang Selatan 15314
soj@batan.go.id

ABSTRAK

KAJIAN EKUIVALENSI KACA TIMBAL DENGAN TIMBAL MURNI MENGGUNAKAN MONTE CARLO. Suatu teknik simulasi MCNP/MCNPX untuk menentukan ketebalan kaca timbal yang dibutuhkan sebagai perisai radiasi, relatif terhadap timbal murni, diusulkan dan dicoba. Pada simulasi ini, perisai radiasi dibandingkan berdasarkan deposisi energi pada keping silikon yang dilindungi oleh plat timbal dan perisai nol atau tanpa perisai, keduanya sebagai pembandingan, dan kaca timbal yang hendak dikarakterisir. Tiga komposisi kaca timbal disimulasi, yakni sesuai model dari Department of Homeland Security, Amerika Serikat, dan dua asumsi komposisi kaca dari MarShield. Sebanyak 14 spektra radiasi yang berbeda digunakan dalam simulasi, dan nilai rerata ketebalan ekuivalen yang diperoleh digunakan sebagai nilai faktor ekuivalensi k_{eq} . Ditemukan bahwa k_{eq} adalah 2,378, 4,550, dan 4,557 untuk ketiga komposisi kaca timbal itu. Simulasi lebih lanjut dilakukan untuk verifikasi k_{eq} , dan untuk ketebalan tidak lebih dari 3,2 mm timbal ekuivalen, faktor atenuasi timbal dan kaca timbal tidak berbeda lebih dari 8,02%. Teknik simulasi ini akan bermanfaat untuk menentukan ketebalan perisai radiasi kaca timbal yang dibutuhkan untuk aplikasi tertentu.

Kata kunci : kaca timbal, perisai radiasi, koefisien atenuasi, MCNP, Monte Carlo.

ABSTRACT

STUDY OF LEAD GLASS AND PURE LEAD EQUIVALENCE USING MONTE CARLO. An MCNP/MCNPX simulation technique to determine the required thickness of lead glass for radiation shielding, relative to pure lead, has been proposed and tried. In this simulation, radiation shieldings are compared based on energy deposition on silicon chips protected by lead and null shielding, or absence of shielding, both as bases of comparison, and the lead glass under characterization. Simulated were three different lead glass compositions, namely the model from the US Department of Homeland Security and two assumed MarShield lead glass compositions. A total of 14 distinct radiation spectra were used in simulations, and the average equivalent thickness obtained was used as the equivalence factor k_{eq} . It was found that k_{eq} values were 2.378, 4.550, and 4.557 for the three lead glass compositions. Further simulations were performed to verify the resulting k_{eq} , and for thicknesses not exceeding 3,2 mm lead equivalent, the attenuation factors of lead and lead glass did not differ by more than 8,02%. The proposed simulation technique will be useful for determining the thickness of lead glass radiation shielding required for an application.

Keywords: lead glass, radiation shielding, attenuation coefficient, MCNP, Monte Carlo.

1. PENDAHULUAN

Perangkat elektronika berbasis semikonduktor semakin banyak digunakan dalam teknologi nuklir dan radiasi. Hal ini berlaku pula dalam radiografi, dimana mikroprosesor dan kamera digital makin lazim digunakan, semisal pada [1][2][3]. Perangkat elektronika semacam itu memiliki keuntungan bahwa mereka menghasilkan data yang mudah diolah secara elektronik. Namun demikian, banyak perangkat

elektronika berbasis semikonduktor tidak dapat beroperasi secara handal pada saat menerima radiasi berlaaju dosis tinggi. Mengingat intensitas radiasi yang digunakan seringkali tidak dapat diturunkan hingga di bawah nilai tertentu, maka perisai radiasi (*shielding*) digunakan untuk membatasi paparan terhadap perangkat elektronik tersebut. Salah satu material yang banyak digunakan sebagai perisai radiasi adalah kaca timbal, yang merupakan material yang sering digunakan untuk perisai radiasi transparan, semisal untuk kamera pada suatu sistem radiografi.

Dalam penggunaan perisai radiasi, penentuan ketebalan perisai berdasarkan perhitungan atau simulasi akan lebih menghemat waktu dan mungkin biaya dibandingkan penentuan secara coba-coba (*trial and error*). Kedua cara ini akan memerlukan informasi mengenai karakteristik atenuasi material perisai radiasi. Karakteristik tersebut dapat dinyatakan dengan berbagai parameter, semisal koefisien atenuasi^[4] atau *buildup factor*^{[5][6]}. Namun demikian, dalam banyak kasus, perhitungan secara teoritis terlalu sulit dilakukan. Selain itu, karakterisasi lengkap akan sangat menyita waktu. Adapun simulasi rancangan menggunakan metode Monte Carlo, semisal dengan menggunakan perangkat lunak MCNP, cenderung membutuhkan sangat banyak waktu. Walaupun penggunaan MCNP bisa menjadi keharusan pada tahap perancangan rinci, namun pada tahap awal, diperlukan suatu cara lain yang lebih sederhana dan cepat. Apabila diketahui ekuivalensi antar material perisai radiasi, semisal antara kaca timbal dan timbal murni, maka ketebalan perisai kaca timbal akan bisa ditentukan apabila ketebalan perisai timbal yang dibutuhkan diketahui. Adapun ketebalan perisai timbal yang dibutuhkan dapat diperhitungkan dengan cepat pada tahap awal, semisal menggunakan perangkat lunak Rad Pro^[7]. Perlu diingat bahwa kaca timbal dapat memiliki komposisi yang beragam^[8-12], sehingga suatu ekuivalensi hanya berlaku untuk satu jenis kaca timbal. Pada makalah ini, akan dipaparkan suatu teknik simulasi MCNP yang dapat digunakan untuk memerkirakan perbandingan ketebalan, atau ekuivalensi, antara timbal dan kaca timbal yang memiliki keefektifan yang sama sebagai perisai radiasi.

2. DASAR TEORI

Tujuan kegiatan ini adalah untuk mencari aturan praktis (*rule of thumb*) ekuivalensi antara timbal dan kaca timbal. Hendak dicari suatu faktor ekuivalensi k_{eq} sedemikian hingga, misalnya, 1 mm timbal murni akan menjadi perisai radiasi yang sama efektifnya dengan $k_{eq,KT} \times 1$ mm kaca timbal jenis KT. Selanjutnya, apabila ketebalan timbal x_{pb} yang diperlukan untuk mencapai tingkat atenuasi yang diperlukan diketahui, ketebalan kaca timbal yang diperlukan diperhitungkan dari:

$$x_{KT} = x_{pb} k_{eq,KT} \quad (1)$$

dimana:

- x_{KT} : ketebalan kaca timbal yang menghasilkan atenuasi yang diperlukan
- $k_{eq,KT}$: faktor ekuivalensi material kaca timbal (KT).

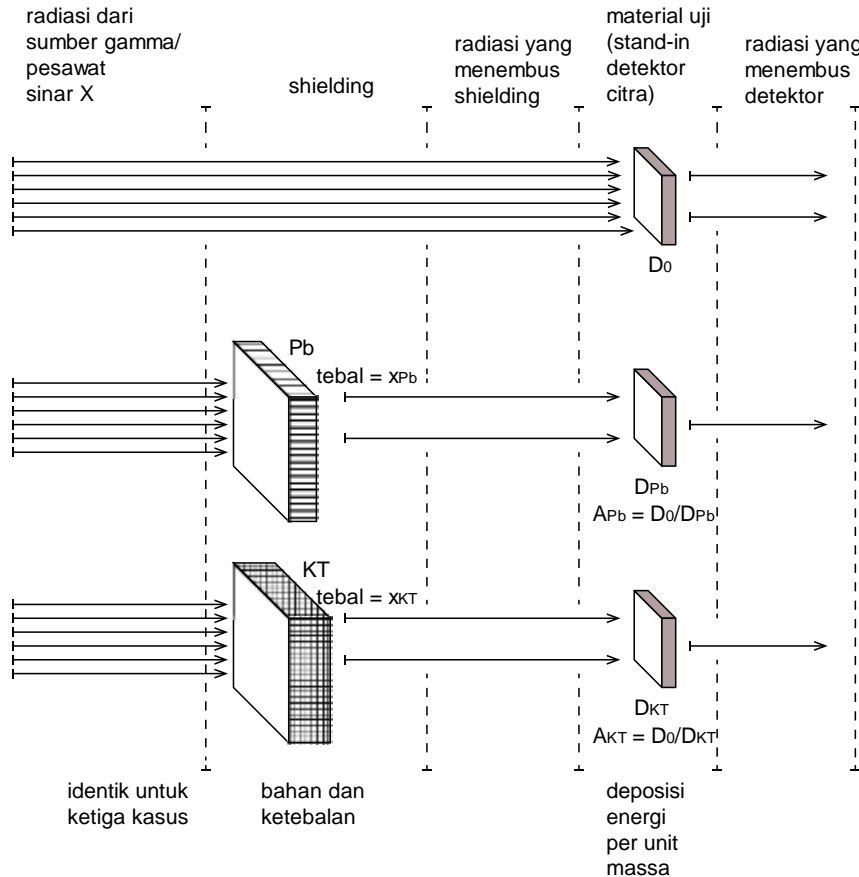
Dengan digunakannya persamaan (1), karakterisasi direduksi menjadi untuk menentukan k_{eq} . Hal ini hanya perlu dilakukan satu kali, dan dapat dilakukan dengan menggunakan simulasi Monte Carlo. Pada prinsipnya, suatu perisai radiasi dari timbal setebal x_{pb1} digunakan sebagai pembanding untuk perisai radiasi dari kaca timbal yang dimaksud, semisal KT1, dengan ketebalan x_{KT1} . Faktor atenuasi kedua perisai itu dibandingkan, di mana faktor atenuasi untuk suatu material m , A_m , didefinisikan mengikuti Gambar 1, sebagai berikut:

$$A_m = \frac{D_0}{D_m} \quad (2)$$

dimana:

D_0 = : laju dosis pada material uji saat perisai radiasi tidak digunakan.

D_m : laju dosis pada material uji saat perisai radiasi digunakan.



Gambar 1. Susunan dasar penentuan k_{2q} kaca timbal.

Bila kita gunakan $A_{pb} = A_{KT} = 2$, maka kita hanya perlu membandingkan HVL (*half-value layer*) bahan. Karena di sini hanya perkiraan kasar yang hendak dicari, maka persamaan paling sederhana digunakan untuk menentukan HVL. Mengingat perisai radiasi melemahkan radiasi secara eksponensial, maka dengan mengikuti definisi HVL, persamaan (3) berlaku:

$$D = D_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{HVL}} \quad (3)$$

Perkiraan kasar nilai HVL bahan dapat menggunakan persamaan (3) dan persamaan (2) untuk faktor atenuasi, sehingga menghasilkan persamaan (4) di bawah ini.

$$HVL = x \frac{\ln 2}{\ln A} \quad (4)$$

Dari (4), dapat ditentukan faktor ekuivalensi dengan membandingkan HVL kedua material, dengan menggunakan persamaan (1), seperti diberikan dalam (5):

$$k_{eq,KT} = \frac{HVL_{KT}}{HVL_{Pb}} = \frac{x_{KT} \ln A_{Pb}}{x_{Pb} \ln A_{KT}} \quad (5)$$

Pada (5), subskrip Pb dan KT menyatakan bahwa parameter tersebut adalah untuk timbal dan kaca timbal. Idealnya, dalam simulasi mengikuti Gambar 1, $A_{Pb} = A_{KT}$. Dalam hal itu, $k_{eq,KT} = x_{KT}/x_{Pb}$. Akan tetapi, memenuhi tuntutan ini akan menuntut terlalu banyak iterasi simulasi secara *trial and error* dengan berbagai x_{Pb} dan x_{KT} , serta hasilnya kurang bermanfaat. Menuntut terlalu banyak iterasi, karena pada mulanya x_{KT} yang diperlukan untuk mencapai $A_{Pb} = A_{KT}$ mungkin tidak diketahui. Kurang bermanfaat, karena nilai x_{KT} tersebut tergantung energi foton, sehingga untuk sumber yang berbeda, x_{KT} mungkin perlu berbeda, padahal pesawat sinar-X menghasilkan radiasi dengan spektrum kontinyu yang tergantung jenis pesawat yang digunakan. Dengan demikian, adalah lebih praktis dan bermanfaat untuk menebak suatu solusi dengan $A_{Pb} \approx A_{KT}$, menggunakan tebakan itu dalam simulasi MCNP, kemudian memperkirakan $k_{eq,KT}$ dari hasil simulasi itu. Simulasi perlu dilakukan pada beberapa energi atau spektrum foton yang representatif.

Ketebalan kaca timbal yang dibutuhkan untuk simulasi dalam menentukan faktor ekuivalensi ini tidak diketahui. Meskipun demikian, beberapa pengamatan dapat dibuat. Pertama, ketebalan material itu tidak boleh terlalu tipis, karena bila terlalu tipis, faktor atenuasi akan terlalu rendah, dan akan sulit untuk memperkirakan HVL. Kedua, material itu juga tidak boleh terlalu tebal, karena bila terlalu tebal, akan sulit untuk mencapai hasil simulasi MCNP yang secara statistik sah dalam waktu yang bisa diterima. Kesahihan statistik dalam simulasi Monte Carlo ditentukan oleh banyaknya foton yang berinteraksi dengan pengganti detektor citra, dan tipisnya detektor itu berarti bahwa jumlahnya hanya substansial bila jumlah foton yang tiba sangat besar. Dengan kata lain, atenuasi yang ditimbulkan oleh material perisai radiasi yang disimulasi tidak boleh terlalu besar. Di sini, secara sembarang, kita gunakan ketebalan material perisai radiasi (*shielding*) yang menghasilkan $A =$ sekitar 2 sampai sekitar 10, dan $A_{KT}/A_{Pb} = 0,8$ sampai 1,2. Sebagai tebakan awal, untuk memperkirakan HVL timbal, kita dapat menggunakan rumus (6) berikut, dimana nilai (μ/ρ) diperoleh dari [13].

$$HVL = \frac{1}{(\mu/\rho)_p} \ln 2 \quad (6)$$

Lebih lanjut, dapat dianggap bahwa seluruh atenuasi kaca timbal ditimbulkan oleh timbal; dengan demikian, $k_{eq,KT}$ kurang lebih berbanding terbalik dengan massa timbal per satuan volume kaca. Adapun untuk Pb murni, $\rho = 11,35 \text{ g/cm}^3$ [10]. Dapat dilihat bahwa $k_{eq,KT} =$ sekitar 5 untuk kaca timbal dari [10], dengan $\rho = 4,36 \text{ g/cm}^3$ dan kadar PbO sekitar 55%, atau sekitar 2,5 untuk [8], dengan $\rho = 6,22 \text{ g/cm}^3$ dan kadar Pb = 75%. Selanjutnya, berdasarkan hasil simulasi, nilai $k_{eq,KT}$ ditentukan dengan persamaan (5).

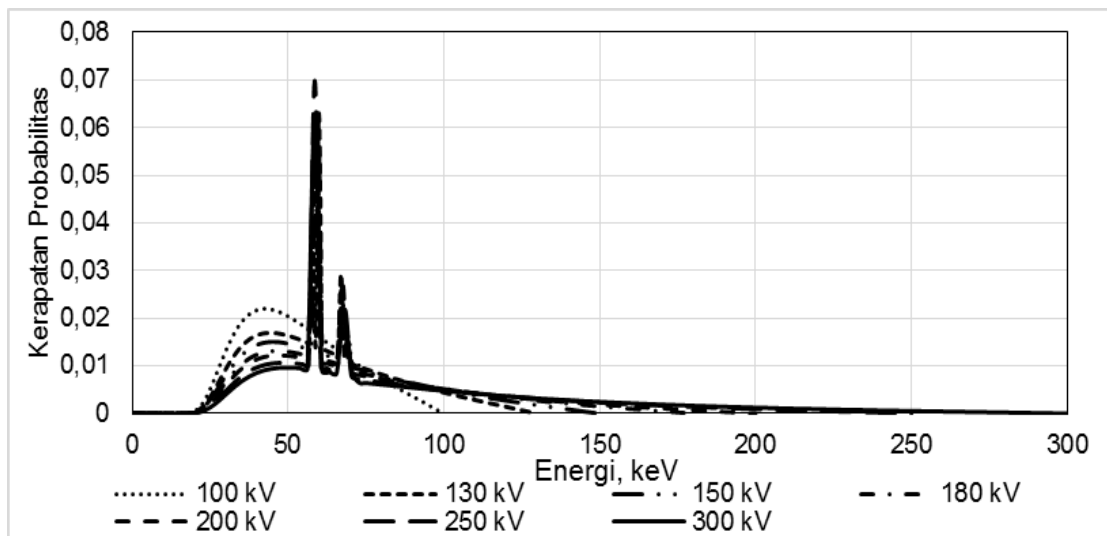
Perlu dipertimbangkan bahwa $k_{eq,KT}$ mungkin berbeda untuk spektra foton yang berbeda. Misalnya, $k_{eq,KT}$ untuk gamma monoenergetik 145 keV dari Yb-169 akan berbeda dari $k_{eq,KT}$ untuk pesawat sinar-X yang beroperasi pada 180 kV dan menghasilkan radiasi dengan spektrum energi foton kontinyu 0-180 keV. Akan tetapi, akan lebih sederhana penggunaannya bila hanya satu angka $k_{eq,KT}$ yang dihasilkan, dan satu angka itu cukup akurat untuk beberapa jenis spektrum yang berbeda. Dengan demikian, dilakukanlah sejumlah simulasi dengan spektrum energi foton yang beragam. Diharapkan $k_{eq,KT}$ yang dihasilkan tidak akan terlalu berbeda, dan nilai akhir $k_{eq,KT}$ yang diterima adalah rerata nilai-nilai $k_{eq,KT}$ yang dihasilkan.

3. TATA KERJA

Untuk memastikan bahwa k_{eq} yang dihasilkan cukup akurat untuk berbagai jenis radiasi gamma dan sinar-X, sebanyak 14 spektra digunakan, yaitu:

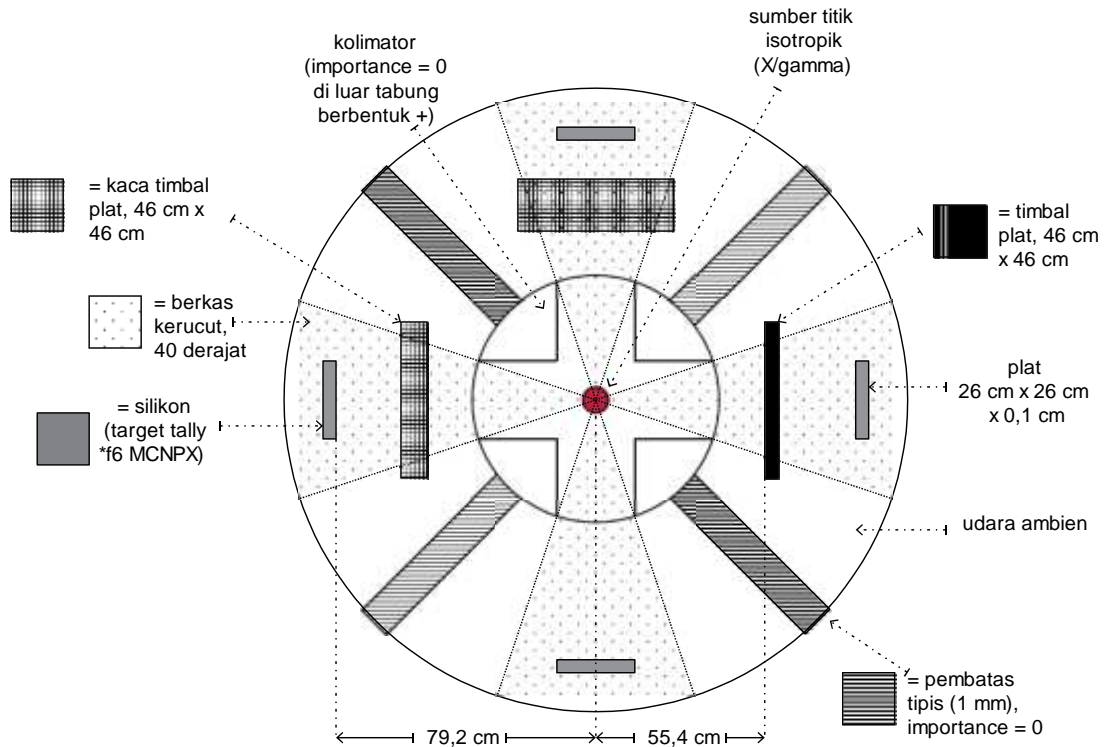
- Monoenergetik 100, 130, 150, 180, 200, 250, dan 300 keV.
- Kontinyu, meniru sinar-X, dengan tegangan 100, 130, 150, 180, 200, 250, dan 300 kV, dengan target wolfram setebal 1 mm dan jendela aluminium 4 mm

Spektrum kontinyu didapatkan dengan menggunakan perangkat lunak aRTist dari BAM (*Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung*, atau Institut Penelitian dan Pengujian Bahan Federal, Jerman). Gambar 2 menunjukkan grafik fungsi kepadatan probabilitas spektrum foton sinar-X kontinyu yang digunakan.



Gambar 2. Spektrum Sinar-X Kontinyu yang Digunakan.

MCNPX digunakan untuk semua simulasi Monte Carlo. Walaupun MCNPX bukan versi MCNP terbaru, namun lebih cepat dari versi yang lebih baru. Adapun versi yang lebih tua, semisal MCNP 5.0, kurang nyaman digunakan semisal karena hanya mengijinkan panjang nama file yang lebih terbatas. Geometri pemerkiraan k_{eq} adalah sebagai pada Gambar 3. *Universe* pada geometri ini berupa suatu bola dengan radius 100 cm. Bola ini dibagi menjadi empat irisan 90° yang dipisahkan oleh dinding hampa tipis dengan *importance* nol. Ruang hampa yang mengelilingi bola juga memiliki *importance* nol. Dengan demikian, semua foton yang meninggalkan suatu irisan tidak mencapai irisan lainnya. Sumber isotropis digunakan dan ditempatkan di pusat bola. Sumber ini dikelilingi kolimator yang membentuk sinar pancarannya menjadi kerucut dengan sudut puncak 40° dan sumbu sejajar dengan sumbu x atau y. Pada keempat kuadran ditempatkan lempengan silikon yang berfungsi sebagai pengganti detektor citra. Intensitas radiasi yang menembus material perisai radiasi diukur dari besar deposisi energi radiasi pada keempat lempengan silikon itu. Penentuan dosis serapan energi pada keping silikon dilakukan dengan menggunakan *tally *f6* pada MCNPX^[14]. Ketiga perisai radiasi memiliki lebar dan tinggi 46 cm. Keping pada sumbu y- tidak mendapat perisai. Keping ini digunakan untuk memperkirakan D_0 . Keping pada sumbu x+ mendapat shielding berupa suatu plat timbal. Dengan demikian, HVL timbal dapat diperhitungkan untuk situasi ini. Perhatikan bahwa ini bukan situasi berkas sempit.



Gambar 3. Model geometri dan material untuk simulasi MCNPX penentuan k_{eq} .

Keping pada sumbu x- dilindungi oleh perisai radiasi dari kaca timbal untuk mana HVL hendak diperkirakan. Keping pada sumbu y+ dilindungi oleh kaca timbal setebal 30 mm. Ketebalan ini digunakan karena ini suatu kemungkinan yang dipertimbangkan untuk suatu modul multikamera yang sedang dirancang^[15]. Pada makalah ini, keping ini tidak digunakan dalam simulasi dan hasil untuk bagian ini tidak dilaporkan, karena sulitnya mendapatkan hasil simulasi yang memenuhi tuntutan fluktuasi *tally*. Ketebalan kaca timbal ini berakibat faktor atenuasi menjadi sangat tinggi, sehingga jumlah foton yang mencapai keping silikon terlalu sedikit untuk memperoleh hasil simulasi Monte Carlo yang stabil. Simulasi atas perisai radiasi tebal semacam ini akan menjadi bagian dari suatu kegiatan selanjutnya.

Pada kuadran lain (y-) didefinisikan material shielding yang hendak diuji. Pada simulasi ini digunakan tiga komposisi yang berbeda, yakni:

- Komposisi 0 (Pb): Timbal murni. Bukan kaca. Digunakan sebagai perbandingan.
- Komposisi I (KT1): mengikuti [10], dengan kandungan Pb 75% dan $\rho = 6,22 \text{ g/cm}^3$.
- Komposisi II (KT2): mengikuti [8], dengan 55% PbO_2 , 5% BaO, selebihnya SiO_2 , dan $\rho = 4,36 \text{ g/cm}^3$.
- Komposisi III (KT3): mengikuti [8], dengan 55% PbO_2 , 5% BaO, selebihnya kaca borosilikat dengan komposisi seperti pada [16], $\rho = 4,36 \text{ g/cm}^3$.

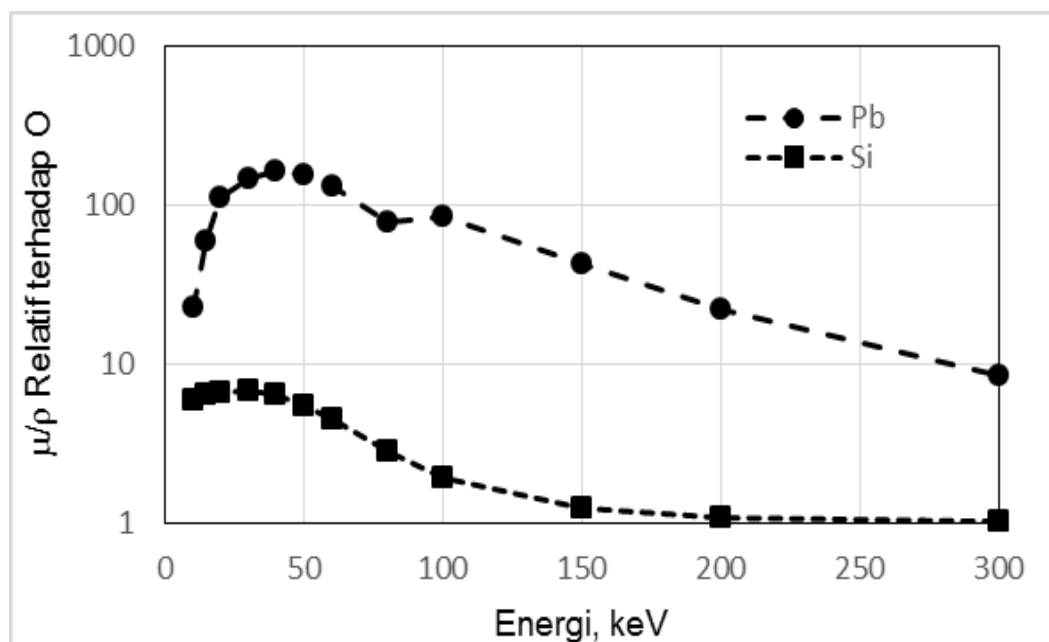
Jumlah partikel yang digunakan diusahakan untuk memungkinkan didapatkannya hasil yang memenuhi kesahihan statistik *tally*. MCNPX melaksanakan pemeriksaan fluktuasi *tally* (TFC – *tally fluctuation chart*) untuk memerikakan apakah hasil simulasi yang didapatkan kemungkinan sah^[14]. Namun demikian, keputusan atas keberterimaan hasil simulasi tergantung pada keputusan pengguna perangkat lunak. Penggunaan jumlah foton yang lebih besar dalam simulasi cenderung lebih memungkinkan TFC dipenuhi, namun waktu simulasi yang diperlukan menjadi lebih

lama. Diusahakan menghindari hal ini, mengingat komputer yang digunakan (suatu laptop Lenovo G405 dengan prosesor AMD E1 dengan frekuensi clock 1 GHz, dual core) relatif sangat lambat.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil simulasi MCNPX, ditemukan bahwa ternyata banyak simulasi yang digunakan mengalami masalah dengan kesahihan statistik. Meskipun demikian, pola yang ditampakan oleh hasil simulasi menandakan bahwa hasil simulasi secara keseluruhan adalah sah.

Simulasi pertama yang dilakukan, penentuan k_{eq} mengikuti Gambar 3, memberikan hasil pada Tabel 1, 2, dan 3 untuk KT1, KT2, dan KT3. Tabel 2 dan 3 memberikan hasil yang mirip, dengan perbedaan antara $k_{eq,KT2}$ dan $k_{eq,KT3}$ tidak mencapai 1%. Hal ini dapat diduga, mengingat kandungan 40% borosilikat atau silika lebur (*fused silica*) pada kaca timbal ini mungkin tidak banyak menyumbangkan atenuasi dibandingkan kandungan timbal. Dengan demikian, walaupun sebagian besar hasil *tally* Tabel 1-3 tidak memenuhi TFC, ada keyakinan bahwa hasilnya benar. Lebih lanjut, untuk ketiga komposisi, untuk sinar gamma monoenergetik, nilai k_{eq} agak menurun dengan meningkatnya tegangan. Hal ini mungkin karena, seperti ditampikan pada Gambar 4, di atas 100 keV, μ/ρ unsur-unsur pembentuk kaca makin mirip dengan naiknya energi foton. Untuk tiga unsur yang paling banyak terdapat pada kaca timbal, yakni Pb, Si, dan O, perbandingan μ/ρ Pb:Si:O menurun dari 35,78:1,18:1 pada 100 keV menjadi 3,77:1,01:1 pada 300 keV, berdasarkan data NIST pada acuan [17][13][18]. Untuk sinar-X dengan spektrum kontinyu, ketergantungan $k_{eq,KT}$ atas energi lebih sulit ditafsirkan mengingat energi foton yang terlibat lebih beragam. Meskipun demikian, dianggap bahwa hasil simulasi mungkin sekali akurat, mengingat hasil yang diberikan secara intuitif masuk akal. Dengan bervariasinya energi foton, maka energi rerata foton \bar{E} tidak terlalu banyak dipengaruhi tegangan puncak, dan k_{eq} lebih mendekati konstan.



Gambar 4. Perubahan perbandingan μ/ρ (Pb:Si:O) sebagai fungsi energi foton.

Tabel 1. Hasil simulasi untuk penentuan $k_{eq,KT1}$.

Spektrum	x_{Pb} , mm	x_{KT1} , mm	A_{Pb}	A_{KT1}	$k_{eq,KT1}$	Lulus TFC?
γ, 100 keV	0,4	1	4,853	5,096	2,425	Ya
γ, 130 keV	1	2,5	11,936	13,735	2,366	Ya
γ, 150 keV	1	2,5	6,246	6,900	2,371	Ya
γ, 180 keV	2	5	13,009	15,124	2,361	Ya
γ, 200 keV	2	5	7,299	8,368	2,339	Ya
γ, 250 keV	2	5	3,219	3,554	2,305	Ya
γ, 300 keV	2	5	2,165	2,343	2,268	Ya
X, 100 kV	0,2	0,5	6,756	7,215	2,417	Ya
X, 130 kV	0,2	0,5	5,289	5,624	2,411	Ya
X, 150 kV	0,2	0,5	4,721	5,037	2,400	Ya
X, 180 kV	0,2	0,5	4,264	4,493	2,413	Ya
X, 200 kV	0,2	0,5	3,979	4,196	2,408	Ya
X, 250 kV	0,2	0,5	3,445	3,631	2,398	Ya
X, 300 kV	0,2	0,5	3,154	3,281	2,417	Ya

Tabel 2. Hasil simulasi untuk penentuan $k_{eq,KT2}$.

Spektrum	x_{Pb} , mm	x_{KT2} , mm	A_{Pb}	A_{KT2}	$k_{eq,KT2}$	Lulus TFC?
γ, 100 keV	0,4	2	4,862	5,433	4,672	Ya
γ, 130 keV	0,4	2	2,493	2,653	4,680	Ya
γ, 150 keV	1	5	6,245	7,282	4,613	Ya
γ, 180 keV	1	5	3,347	3,750	4,570	Ya
γ, 200 keV	2	10	7,299	9,043	4,514	Ya
γ, 250 keV	2	10	3,222	3,839	4,349	Ya
γ, 300 keV	3	15	3,246	4,114	4,162	Ya
X, 100 kV	0,2	1	6,804	8,078	4,589	Ya
X, 130 kV	0,2	1	5,291	6,180	4,573	Ya
X, 150 kV	0,2	1	4,767	5,480	4,590	Tidak
X, 180 kV	0,2	1	4,244	4,817	4,597	Tidak
X, 200 kV	0,2	1	3,968	4,469	4,603	Tidak
X, 250 kV	0,2	1	3,479	3,881	4,597	Ya
X, 300 kV	0,2	1	3,138	3,476	4,590	Tidak

Tabel 3. Hasil simulasi untuk penentuan $k_{eq,KT3}$.

Spektrum	x_{Pb} , mm	x_{KT3} , mm	A_{Pb}	A_{KT3}	$k_{eq,KT3}$	Lulus TFC?
γ, 100 keV	0,4	2	4,862	5,419	4,679	Tidak
γ, 130 keV	0,4	2	2,493	2,649	4,687	Ya
γ, 150 keV	1	5	6,245	7,263	4,619	Tidak
γ, 180 keV	1	5	3,347	3,740	4,579	Tidak
γ, 200 keV	2	10	7,299	9,012	4,521	Tidak
γ, 250 keV	2	10	3,222	3,831	4,355	Tidak
γ, 300 keV	3	15	3,246	4,106	4,168	Ya
X, 100 kV	0,2	1	6,804	8,047	4,598	Ya
X, 130 kV	0,2	1	5,291	6,159	4,582	Ya
X, 150 kV	0,2	1	4,767	5,464	4,598	Tidak
X, 180 kV	0,2	1	4,244	4,806	4,604	Tidak
X, 200 kV	0,2	1	3,968	4,457	4,612	Tidak
X, 250 kV	0,2	1	3,479	3,875	4,602	Ya
X, 300 kV	0,2	1	3,138	3,469	4,597	Tidak

Nilai k_{eq} dari rerata untuk 14 spektra, didapatkan hasil yang didapatkan ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai k_{eq} untuk kaca timbal yang diuji.

Bahan	k_{eq}
Komposisi I	2,378
Komposisi II	4,550
Komposisi III	4,557

Nilai $k_{eq,KT2}$ dan $k_{eq,KT3}$ yang diperoleh di sini sangat mirip dengan nilai pada [8], dimana $k_{eq} = 4,4-4,5$ pada 150 kV (perbedaan 4%) dan 4,67-5,15 pada 200 kV (perbedaan 13%). Akan tetapi, spectra sinar-X uji tidak dijelaskan pada [8], dan tidak dijelaskan juga apakah nilai tipikal atau kasus terburuk yang diberikan. Pada makalah ini, hanya nilai tipikal yang bisa diuji, karena keseragaman atau variasi komposisi kaca antara batch tidak disimulasi. Dengan demikian, perbandingan langsung sulit dilakukan, tetapi hasilnya yang mirip itu tampaknya mendukung metode simulasi yang diusulkan di sini. Sedangkan untuk $k_{eq,KT1}$, nilainya secara intuitif terlihat benar; densitas serta kadar timbal KT1 yang lebih tinggi menjadikannya lebih efektif sebagai perisai radiasi.

5. KESIMPULAN

Suatu metode pemerkiraan ekuivalensi timbal vs. kaca timbal menggunakan simulasi MCNPX telah diciptakan dan digunakan. Nilai ekuivalensi ketebalan k_{eq} telah diperkirakan dari simulasi dengan 14 spektrum yang berbeda, dan hasilnya adalah 2,378, 4,550, dan 4,557 untuk KT1, KT2, dan KT3. Dalam simulasi yang dilakukan untuk melakukan verifikasi atas hasil yang didapat, ditemukan bahwa semakin tebal suatu perisai radiasi, semakin kurang akurat penggunaan estimasi k_{eq} untuk memperkirakan atenuasi, dengan perbedaan kurang dari 1% pada tebal timbal ekuivalen 0,5 mm tetapi mencapai 8% pada 3,2 mm.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Fahrurrozi Akbar, PSTBM-BATAN, atas informasi dan bantuan teknisnya mengenai komposisi kaca timbal.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Anonim, 2013, *IAEA Radiation Technology Report No. 2, Design, Development and Optimization of A Low Cost System for Digital Industrial Radiology*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria
- [2]. Winch, N.M. dan Edgar, A., 2012, *X-ray imaging using digital cameras*, Pelc, NJ (ed.), *Medical Imaging 2012: Physics of Medical Imaging*, Proceedings of SPIE Vol. 8313, doi:10.1117/12.911146
- [3]. Fan, H, Durko, HL, Moore, SK, Moore, J, Miller, BW, Furenlid, LR, Pradhan, S, dan Barrett, HH, *DR with a DSLR: Digital Radiography with a Digital Single-Lens Reflex camera*, Samei, E, Norbert J. Pelc, NJ (eds.), *Medical Imaging 2010: Physics of Medical Imaging*, Proceedings of SPIE, Vol. 7622, doi: 10.1117/12.844056

- [4]. Anonim, *X-Ray Mass Attenuation Coefficients*, <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>, diunduh Mei 2019
- [5]. Fullwood, Ralph, 1992, *Lecture Notes for Criticality Safety*, Brookhaven National Laboratory, Upton, USA
- [6]. Anonim, 2007, *Industrial Radiography, Image Forming Techniques*, GE Inspection Technologies, Boston, USA
- [7]. McGinnis, Ray, *Rad Pro Calculator: Online Nuclear Calculations and Free Health Physics Software*, <http://www.radprocalculator.com/>, diunduh Juni 2017
- [8]. Anonim, 2017, *Radiation Shielding Lead Glass*, MarShield Custom Radiation Shielding, Burlington, Canada
- [9]. Anonim, 2013, *Data Sheet Lead Glass (X-Ray Protection)*, UQG Optics, Cambridge, UK
- [10]. McConn RJ Jr, Gesh CJ, Pagh RT, Rucker RA, dan Williams RG III, 2011, *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling*, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA
- [11]. Anonim, Lead Glass, https://en.wikipedia.org/wiki/Lead_glass, diunduh Agustus 2020
- [12]. Kristiyanti, Istofa, dan Beny Syawaludin, November 2012, Karakterisasi Kaca Timbal untuk Pelindung Penangkap Citra Sinar-X, Prima, Vol. 9, No. 2, pp. 86-93
- [13]. Anonim, *X-Ray Mass Attenuation Coefficients - Lead*, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z82.html>, diunduh Juli 2020
- [14]. X-5 Monte Carlo Team, 2003, *MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory*, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA
- [15]. Natanael, RG, 2020, Komunikasi Pribadi
- [16]. Anonim, Borosilicate glass, https://en.wikipedia.org/wiki/Borosilicate_glass, diunduh Juni 2020
- [17]. Anonim, *X-Ray Mass Attenuation Coefficients - Silicon*, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z14.html>, diunduh Juli 2020
- [18]. Anonim, *X-Ray Mass Attenuation Coefficients - Oxygen*, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z08.html>, diunduh Juli 2020

-oOo-