

ANALISIS PERFORMA TIMBAL DAN BESI MEREDAM RADIASI FOTON 2 MEV DENGAN SIMULASI MONTE CARLO

Sitti Yani*

Divisi Fisika Teori, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor (IPB University), Jalan Meranti, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680, Indonesia
*e-mail: sittyani@apps.ipb.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa dua material perisai, Timbal dan Besi, dalam mengatenuasi partikel foton berenergi 2 MeV dengan simulasi Monte Carlo (MC). Kode MC EGSnrc digunakan sebagai perangkat lunak yang mensimulasikan interaksi sumber foton dengan material perisai. Sumber diletakkan pada jarak 10 cm, 50 cm, dan 100 cm dari perisai. Ketebalan perisai juga divariasikan pada nilai 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Scoring plane didefinisikan setelah perisai yang bertanggung jawab menyimpan data partikel yang melewati perisai dan dianalisis untuk memperoleh karakteristik distribusi spektrum partikel-partikel tersebut. Distribusi spektrum pada kedua material perisai sangat dipengaruhi oleh jarak antara sumber dengan perisai dan ketebalannya. Jarak sumber dan perisai yang jauh menyebabkan meningkatnya jumlah partikel yang melewati perisai baik pada Timbal maupun Besi. Sementara itu, interaksi Compton dan efek fotolistrik terjadi ketika foton memasuki material perisai. Perisai yang tebal menyebabkan foton mendeposisikan keseluruhan energinya ketika berinteraksi dengan atom perisai sehingga foton yang sampai pada scoring plane lebih sedikit dibanding pada perisai yang ketebalannya lebih rendah. Partikel sekunder yakni elektron juga dihasilkan akibat interaksi ini. Timbal dapat mengatenuasi lebih dari 90% foton yang melewatinya sedangkan Besi dapat mengatenuasi pada nilai persentase yang lebih rendah. Hal ini dipengaruhi oleh perbedaan densitas kedua material.

Kata Kunci: Besi; EGSnrc; Monte Carlo; Perisai Radiasi; Timbal

ABSTRACT

[Title: The Shielding Ability of Lead and Iron to attenuate 2 MeV Photon in Monte Carlo Simulation] Two materials, Lead and Iron, were analyzed for their ability to attenuate 2 MeV photon beam. The EGSnrc code is used to perform this simulation. The photon source was located at various distances with shielding material, e.g., 10 cm, 50 cm, and 100 cm. All the shielding abilities of these materials are simulated with varied thickness of 5 cm, 10 cm, and 15 cm. The scoring plane was placed right after the shielding materials to collect the particles passed through the shielding. Spectral distributions of these particles in the scoring plane were analyzed using BEAMDP. These distributions strongly depend on distance between source and shielding and shielding thickness. Long distance of shielding and source causes an increase in the number of particles that can pass the shield. This phenomena can be seen in Lead and Iron. Meanwhile, the Compton scattering and photoelectric effect happened inside the shield when the photon entered it. Most of its energy is deposited in the thicker shield volume that causes the number of photons attenuated by the shield and its energy reduced. The secondary particle, electron, produced during the interaction. Lead can attenuate more than 90% of incident photons whereas iron does not because of the difference of their density.

Keywords: Iron; EGSnrc; Monte Carlo; Radiation Shielding; Lead

PENDAHULUAN

Teknologi radiasi sangat membantu kehidupan manusia saat ini. Teknologi radiasi berkontribusi dalam pertumbuhan ekonomi dan industri seperti aplikasi dalam medis dan kedokteran gigi (CT, sinar-X, PET); radioterapi (radiasi dapat membunuh kanker) (Yani dkk., 2020); pengawetan makanan (radiasi dapat membunuh bakteri) (Caulfield dkk.,

(2008); analisis aktivasi partikel (radiasi dapat mengetahui komposisi material) (Smolińska dkk., 2020); sumber sinar gamma seperti ^{60}Co , ^{192}Ir , atau sinar-X dapat digunakan untuk mengetahui kecacatan material pada sistem komunikasi, reaktor nuklir, dan material maju (Domain dkk., 2004). Namun, radiasi ini memiliki efek yang berbahaya ketika berinteraksi dengan makhluk hidup. Radiasi dengan dosis yang

tinggi dapat menyebabkan terbakarnya kulit dalam waktu singkat atau dapat menyebabkan kanker dalam jangka panjang. Oleh karenanya, proteksi radiasi sangat dibutuhkan untuk mengurangi efek berbahaya tersebut.

Proteksi radiasi didasarkan oleh tiga faktor utama yakni material perisai, jarak antara sumber dengan material proteksi, dan lamanya waktu eksposur (Dong dkk., 2021 dan Al-Burihi dkk., 2020). Beberapa jenis material seperti beton, batu bata tanah liat, ubin, besi, dan timbal sudah banyak digunakan sebagai material perisai. Beberapa peneliti telah melaporkan kemampuan material ini dalam mengatenuasi foton dalam radioterapi maupun radiodiagnostik. Proteksi radiasi dalam radioterapi dimanfaatkan untuk mereduksi dosis ekuivalen yang dihasilkan oleh *linear accelerator* (linac) di luar ruangan treatment sehingga material perisai dengan densitas tinggi dapat digunakan untuk mengurangi jumlah dan energi foton yang melewatinya (Morrow, 2019 dan Yue dkk., 2009).

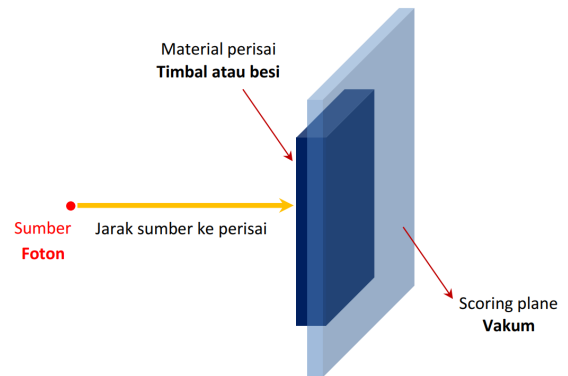
Simulasi Monte Carlo (MC) telah banyak digunakan dalam mempelajari karakteristik material perisai dalam mereduksi jenis partikel tertentu. Osman dkk., (2018) mempelajari karakteristik interaksi foton dengan jenis material perisai seperti beton, besi, timbal, dan beton dengan menggunakan paket MC, PHITS. Semua jenis perisai memiliki ketergantungan yang sangat tinggi pada energi foton yang mengenai perisai. Selain itu, pada penelitian lainnya, timbal oksida yang ditambahkan dengan logam tanah jarang sebagai material perisai dipelajari menggunakan kode MC MCNP. Beberapa parameter yang tidak dapat diperoleh menggunakan metode analitik, namun dapat dihasilkan melalui simulasi MC (Wang dkk., 2020).

Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis performa besi dan timbal sebagai material perisai dalam mengatenuasi radiasi foton 2 MeV menggunakan simulasi MC-EGSnrc.

METODE

Gambar 1 berikut menunjukkan skema simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini. Sumber yang digunakan adalah partikel foton monoenergetik berenergi 2 MeV dengan geometri titik. Sumber diletakkan pada jarak tertentu terhadap perisai yakni 10 cm, 50 cm, dan 100 cm. Perisai berbahan Timbal dan Besi dengan densitas masing-masing adalah sebesar 11.35 g/cm^3 dan 7.8 g/cm^3 . Perisai ini memiliki luasan $10 \times 10 \text{ cm}^2$ dengan ketebalan yang divariasikan pada 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Detektor untuk mendeteksi partikel primer maupun sekunder yang dihasilkan akibat interaksi sumber dan perisai berupa

scoring plane dengan luasan $15 \times 15 \text{ cm}^2$. *Scoring plane* ini didesain berisi material vakum.



Gambar 1. Set-up simulasi

Keseluruhan proses simulasi menggunakan EGSnrc-BEAMnrc, perangkat lunak berbasis Monte Carlo. Perangkat lunak ini memungkinkan untuk menyimulasikan transport partikel berupa foton dan elektron dalam materi tertentu (Rogers dkk., 2021). Geometri perisai didesain menggunakan komponen modul SLABS dengan satu *layer* (lapisan). Teknik optimasi *variance reduction technique* (VRT) tidak diimplementasikan pada simulasi. Energi *cut-off* foton dan elektron masing-masing diatur pada nilai 0.01 MeV dan 0.70 MeV. Jumlah partikel foton yang disimulasikan adalah 1×10^7 partikel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Scoring plane yang didefinisikan sebagai luasan yang terletak di bawah material perisai yang bertanggung jawab mencatat jumlah, jenis, posisi, dan energi partikel yang melewatinya. File yang menyimpan informasi ini dinamakan file phase space (phsp). Ukuran file phsp bergantung pada jumlah partikel yang disimpan dimana masing-masing partikel membutuhkan 8 bit data. File ini selanjutnya dianalisis untuk mengetahui informasi yang dibutuhkan yang berkaitan dengan karakteristik partikel yang melewatinya.

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Agosteo et al. (2007) bahwa performa material perisai bergantung pada beberapa faktor diantaranya jarak antara sumber dan perisai (r), ketebalan perisai (d), dan densitas perisai. Dalam penelitian ini, densitas perisai dibedakan dengan memilih jenis material yang berbeda yaitu Timbal dan Besi. Performa dua material ini akan dianalisis berdasarkan jarak dan ketebalan material perisai dengan melihat partikel yang dapat dan tidak dapat menembusnya.

a. Material Timbal

Material ini digunakan sebagai material yang dapat menghalau foton karena memiliki densitas yang tinggi yang memungkinkan partikel tidak dapat melewatinya dengan energi partikel datang dan ketebalan material tertentu. Tabel 1 berikut menampilkan jumlah partikel foton, elektron, dan keseluruhan partikel yang melewati *scoring plane* dengan variasi ketebalan perisai (*d*) dan jarak antara sumber dan perisai (*r*).

Data ini menunjukkan bahwa penambahan jarak *r* menyebabkan semakin banyak partikel yang

menembus perisai. Untuk *d*=5 cm, jumlah partikel yang melewati perisai adalah 6.5%, 8.7%, dan 9.4% dari total jumlah partikel yang disimulasikan masing-masing untuk *r*=10 cm, *r*=50 cm, dan *r*=100 cm. Partikel yang melewati perisai tidak hanya partikel primer yakni partikel yang tidak berinteraksi dengan material perisai dan langsung melewati *scoring plane*, namun terdapat partikel sekunder. Partikel-partikel sekunder ini dapat berupa foton dan elektron yang merupakan produk interaksi antara foton dengan atom material perisai.

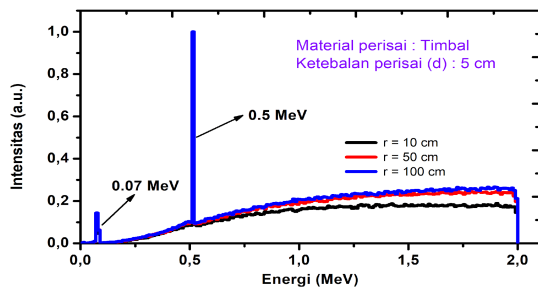
Tabel 1. Jumlah partikel pada *scoring plane* untuk material Timbal

Partikel	<i>d</i> = 5 cm <i>r</i> = 10 cm	<i>d</i> = 5 cm <i>r</i> = 50 cm	<i>d</i> = 5 cm <i>r</i> = 100 cm	<i>d</i> = 10 cm <i>r</i> = 100 cm	<i>d</i> = 15 cm <i>r</i> = 100 cm
All	645973	871569	939904	94654	8726
Foton	641740	866177	934234	94103	8672
Elektron	4233	5392	5670	551	54

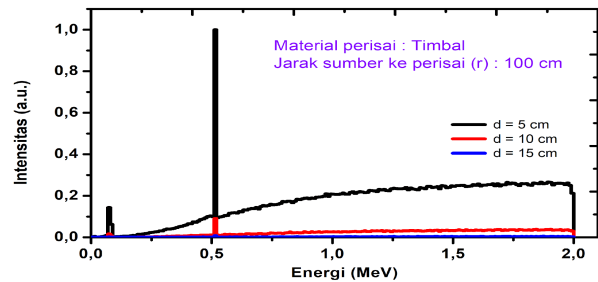
Tabel 2. Jumlah partikel pada *scoring plane* untuk material Besi

Partikel	<i>d</i> = 5 cm <i>r</i> = 10 cm	<i>d</i> = 5 cm <i>r</i> = 50 cm	<i>d</i> = 5 cm <i>r</i> = 100 cm	<i>d</i> = 10 cm <i>r</i> = 100 cm	<i>d</i> = 15 cm <i>r</i> = 100 cm
All	1977803	2329926	2487293	650053	148689
Foton	1965746	2314968	2471189	646440	147945
Elektron	12057	14958	16104	3613	744

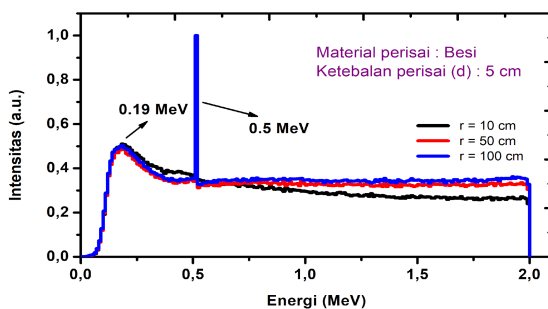
d = ketebalan perisai; *r* = jarak antara sumber dan perisai



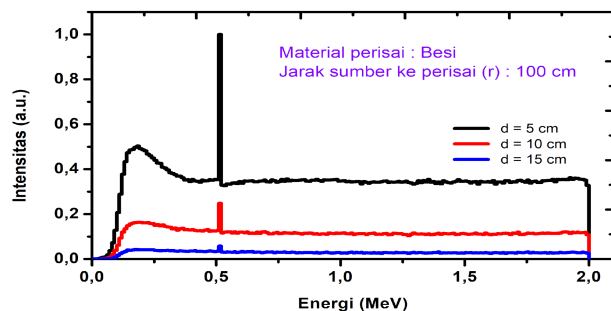
Gambar 2. Distribusi spektrum partikel di *scoring plane* untuk material Timbal dengan variasi jarak sumber terhadap perisai



Gambar 3. Distribusi spektrum partikel di *scoring plane* untuk material Timbal dengan variasi ketebalan perisai



Gambar 4. Distribusi spektrum partikel di *scoring plane* untuk material Besi dengan variasi jarak sumber terhadap perisai



Gambar 5. Distribusi spektrum partikel di *scoring plane* untuk material Besi dengan variasi ketebalan perisai

Simulasi foton berenergi 2 MeV memungkinkan terjadinya interaksi Compton dan fotolistrik yang menghasilkan material sekunder ini. Jumlah elektron yang tersimpan pada *scoring plane* sebesar 6% dari keseluruhan partikel untuk semua ketebalan yang didefinisikan.

Perubahan ketebalan perisai sangat mempengaruhi jumlah partikel yang dapat menembusnya baik foton maupun elektron. Hal ini diakibatkan oleh interaksi foton dan atom material perisai sehingga keseluruhan energi foton terdepositasi di dalam material perisai. Partikel-partikel sekunder yang dihasilkan dalam interaksi ini juga mendeposisikan energinya di dalam material. Partikel yang dapat menembus perisai adalah sebesar 9.40%, 0.94% dan 0.09% masing-masing untuk ketebalan perisai 5 cm, 10 cm, dan 15 cm. Jumlah elektron yang dihasilkan pada $d=15$ cm hanya seperseratus dari elektron pada $d=5$ cm.

Distribusi energi partikel di file phsp setelah material Timbal ditunjukkan pada Gambar 2 di atas. Energi maksimum partikel dalam file ini adalah 2 MeV karena foton yang disimulasikan berenergi 2 MeV. Pada grafik spektrum ini menunjukkan dua *spike* pada energi 0.07 MeV dan 0.5 MeV. *Spike* ini berkaitan dengan karakteristik material yaitu komposisi penyusun material tersebut dan energi foton datang. Pada energi kurang dari 1 MeV, intensitas partikel pada energi yang sama memiliki nilai yang hampir sama. Sementara itu, pada energi lebih besar dari 1 MeV menunjukkan perbedaan intensitas yang rendah pada $r=10$ cm.

Kecenderungan data distribusi spektrum terlihat sangat berbeda untuk variasi ketebalan perisai (Gambar 3). Grafik ini menunjukkan *spike* pada energi yang sama dengan variasi jarak sumber dengan perisai. Pada ketebalan perisai 5 cm, partikel yang sampai pada *scoring plane* memiliki energi yang lebih besar dibanding dengan ketebalan perisai lainnya. Hal ini disebabkan karena foton dari sumber hanya berinteraksi sekali atau tidak berinteraksi dengan material perisai sehingga pada *scoring plane* terdapat partikel dengan energi yang besar bahkan intensitas paling besar adalah partikel berenergi 2 MeV. Intensitas partikel pada ketebalan 10 cm dan 15 cm jauh lebih kecil dibandingkan dengan ketebalan perisai 5 cm. Informasi ini mengkonfirmasi data yang ditampilkan pada Tabel 1.

Kemampuan material Timbal dapat mengatenuasi foton sejalan dengan penelitian lainnya oleh Stukenbroeker dkk., 1970. Walaupun penggunaan Timbal berpotensi berbahaya bagi kesehatan. Oleh karenanya, material Timbal

ditambahkan dengan material lainnya untuk mengatasi hal tersebut (Klein dan Weilandics, 1996).

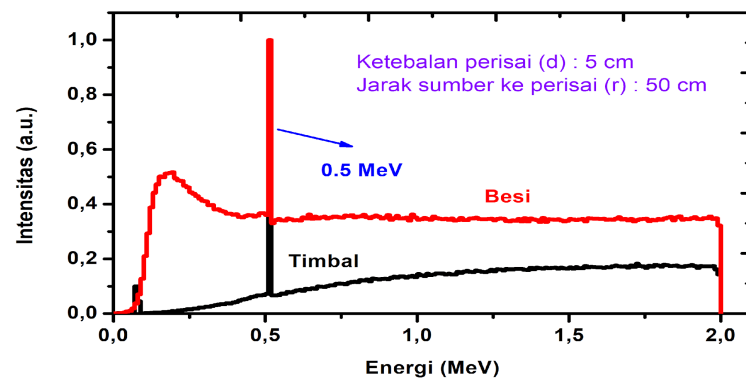
b. Material Besi

Selain Timbal, Besi juga merupakan bahan yang paling banyak dimanfaatkan sebagai material perisai karena memiliki densitas yang tinggi, mudah mendapatkannya, dan harga yang relatif murah dibanding logam-logam lainnya. Informasi partikel yang melewati perisai Besi ditampilkan pada Tabel 2 berikut. Data pada tabel menunjukkan bahwa perubahan jarak antara sumber dengan perisai mengakibatkan perubahan jumlah partikel primer dan sekunder yang melewati *scoring plane*. Jumlah foton dan elektron semakin banyak seiring dengan pertambahan jarak. Pada jarak yang besar, foton akan berinteraksi dengan material udara sebelum berinteraksi dengan material sehingga menyebabkan munculnya partikel-partikel sekunder yang berkontribusi besar terhadap keseluruhan partikel pada *scoring plane*. Hal ini dapat terlihat pada jumlah elektron yang semakin banyak pada jarak 100 cm.

Pada ketebalan perisai 5 cm, jumlah partikel yang melewati *scoring plane* adalah masing-masing sebesar 2.0%, 2.3%, dan 2.4% untuk jarak 10 cm, 50 cm, dan 100 cm. Perubahan ketebalan perisai juga menyebabkan perubahan yang sangat signifikan terhadap jumlah partikel pada *scoring plane*. Keseluruhan partikel yang melewatinya pada ketebalan perisai 15 cm hanya sebesar 1% dari keseluruhan partikel foton yang disimulasikan.

Intensitas partikel tertinggi pada variasi jarak sumber terhadap perisai berada pada energi 0.19 MeV dan 0.50 MeV. Grafik distribusi spektrum pada variasi ini menunjukkan nilai intensitas yang hampir sama untuk setiap variasi jarak (Gambar 4). Pada energi lebih dari 1 MeV, jarak 10 cm menunjukkan nilai yang berbeda. Hal ini diakibatkan karena partikel yang dihasilkan oleh sumber tidak harus berinteraksi dengan lingkungan di antara sumber dan perisai tetapi dapat langsung berinteraksi dengan material perisai.

Distribusi spektrum partikel yang melewati perisai Besi dengan variasi ketebalan ditampilkan pada Gambar 5. Intensitas partikel paling kecil dimiliki oleh ketebalan perisai 15 cm. Hal ini sejalan dengan data pada Tabel 2 yang menunjukkan bahwa jumlah partikel yang dapat melewati perisai hanya sebesar 1.5% dari keseluruhan partikel yang disimulasikan. Sementara itu, energi partikel pada semua ketebalan memiliki distribusi yang sama.



Gambar 6. Perbandingan distribusi spektrum pada *scoring plane* untuk material Timbal dan Besi

c. Perbandingan material Timbal dan Besi

Perbandingan spektrum partikel pada material Timbal dan Besi ditampilkan pada Gambar 6. Perbandingan ini dilakukan pada ketebalan perisai 5 cm dan jarak sumber dengan perisai 50 cm. *Spike* pada energi 0.5 MeV terlihat pada kedua material. Intensitas partikel pada material Besi lebih besar dibandingkan pada material Timbal untuk semua energi. Hal ini berarti bahwa Timbal memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengatenuasi partikel foton karena Timbal memiliki densitas yang lebih besar dibandingkan dengan Besi. Selain itu, Timbal menghasilkan partikel sekunder berupa elektron yang lebih sedikit dibandingkan dengan Besi (Tabel 1 dan 2).

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa secara umum kemampuan Besi tidak lebih baik dari Timbal dapat mengatenuasi foton. Namun, Besi lebih banyak digunakan karena ketersediaannya. Material Besi diasosiasikan dengan material lainnya dalam aplikasinya di fasilitas kesehatan (Srinivasan dan Samuel, 2017 dan Mori dkk., 2020).

KESIMPULAN DAN SARAN

Material Timbal dan Besi memiliki kemampuan dalam mengatenuasi partikel foton 2 MeV. Jumlah dan energi partikel foton yang dapat melewati perisai Timbal sangat dipengaruhi oleh ketebalan perisai. Perisai dengan ketebalan 15 cm memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan dengan ketebalan 5 cm. Fenomena yang sama juga terlihat pada material Besi. Desain dan komposisi perisai yang disimulasikan dalam penelitian ini sangat sederhana dan dapat dikembangkan dengan mensimulasikan material dengan komposisi yang beragam berupa material Timbal atau Besi yang telah digabungkan dengan material lainnya untuk meningkatkan performanya.

DAFTAR PUSTAKA

- Agosteo, S., Magistris, M., Mereghetti, A., Silari, M., & Zajacova, Z. 2007. Shielding Data for 100-250 MeV Proton Accelerators: Double Differential Neutron Distributions and Attenuation in Concrete. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B Beam Interact with Mater Atoms*, 265(2): 581–598.
- Al-Buriahi, M., Bakhsh, E.M., Tonguc, B., & Khan, S.B. 2020. Mechanical and Radiation Shielding Properties of Tellurite Glasses Doped with ZnO and NiO. *Ceram. Int.*, 46: 19078–19083.
- Caulfield, C.D., Cassidy, J.P., & Kelly, J.P. 2008. Effects of Gamma Irradiation and Pasteurization on the Nutritive Composition of Commercially Available Animal Diets. *J Am Assoc Lab Anim Sci.*, 47(6): 61–66.
- Domain, C., Becquart, C.S., & Malerba, L. 2004. Simulation of Radiation Damage in Fe Alloys: An Object Kinetic Monte Carlo Approach. *Journal of Nuclear Materials*, 335 (1): 121-145.
- Dong, M., Zhou, S., Xue, X., Feng, X., Sayyed, M., Khandaker, M., & Bradley, D. 2021. The Potential Use of Boron Containing Resources for Protection against Nuclear Radiation. *Radiat. Phys. Chem.*, 188, 109601.
- Klein, R.C. & Weilandics, C. 1996. Potential health hazards from lead shielding. *Am Ind Hyg Assoc J*, 57(12):1124-6.
- Mori, H., Oku, Y., Mannami, Y., & Kunisada, T. 2020. Iron (III) Oxide-Based Ceramic Material for Radiation Shielding. *Ceramics*, 3: 258–264.
- Morrow, A.M. 2019. Radiation Shielding and Bunker Design. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 18(1): 13320-13332.

- Osman, N.M., Tajudin, S.M., Sabri, A.H.A., Noor, A.F.M., & Aziz, M.Z.A. 2018. Evaluation of Scattering Effects for Radiation Shielding or Filter Materials by Using Monte Carlo Simulation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 1231: 012007.
- Rogers, D.W.O., Walters, B., & Kawrakow, I. 2021. *BEAMnrc Users Manual*. Ottawa: National Research Council of Canada.
- Smolińska, A., Stempin, M., & Howaniec, N. 2020. Unified Method for The Determination of Chemical Composition in Different Types of Materials Using Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. *Measurement*, 163: 108030.
- Srinivasan, K. & Samuel, E.J.J. 2017. Evaluation of Radiation Shielding Properties of the Polyvinyl Alcohol/Iron Oxide Polymer Composite. *J Med Phys.*, 42(4): 273–278.
- Stukenbroeker, G.L., Bonilla, C.F., & Peterson, R.W. 1970. The use of lead as a shielding material. *Nuclear Engineering and Design*, 13(1): 3-145.
- Wang, Y., Wang, G., Hu, T., Wen, S., Hu, S., & Liu, L. 2020. Enhanced Photon Shielding Efficiency of A Flexible and Lightweight Rare Earth/Polymer Composite: A Monte Carlo Simulation Study. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(7): 1565-1570
- Yani, S., Budiansah, I., Pratama, S.H., Rhani, M.F., Anam, C., & Haryanto, F. 2021. Evaluation of the dosimetric characteristics of 10 MV flattened and unflattened photon beams in a heterogeneous phantom. *International Journal of Radiation Research*, 19 (4): 835-841
- Yue, K., Luo, W., Dong, X., Wang, C., Wu, G., Jiang, M., & Zha, Y. 2009. A new lead-free radiation shielding material for radiotherapy. *Radiation Protection Dosimetry*, 133(4): 256–260