



Type of the Paper (Article, Review, Communication, etc.)

Simulasi Monte Carlo Penetrasi Radiasi Alfa, Beta, Gamma, dan Neutron pada Material Pelindung Menggunakan PHITS

Lovely Elsha Shalom Momongan¹, Rizki Budiman^{2*}

^{1,2}Departemen Fisika, Matana University, Tangerang, Indonesia

*Corresponding author email: rizki.budiman@matanauniversity.ac.id

Abstrak: Radiasi pengion memiliki kemampuan penetrasi yang berbeda saat berinteraksi dengan material. Hal ini akan mempengaruhi efektivitas pelindung radiasi. Penelitian ini mensimulasikan penetrasi radiasi alfa, beta, gamma, dan neutron pada berbagai material pelindung menggunakan perangkat lunak PHITS berbasis metode Monte Carlo. Sumber radiasi monoenergetik diarahkan ke material kertas, aluminium, timbal, dan beton, kemudian dianalisis berdasarkan distribusi flux sebelum dan sesudah material. Hasil simulasi menunjukkan bahwa radiasi alfa terhenti oleh kertas, radiasi beta oleh aluminium, sedangkan radiasi gamma dan neutron memiliki daya penetrasi lebih tinggi dengan reduksi flux yang bergantung pada jenis dan ketebalan material. Interaksi radiasi juga menghasilkan radiasi tambahan dengan flux pada orde 10^{-7} hingga 10^{-4} cm^{-2} per sumber. Studi ini menegaskan bahwa efektivitas pelindung radiasi bergantung pada jenis radiasi dan material, serta menunjukkan keandalan simulasi Monte Carlo dalam kajian proteksi radiasi.

Kata Kunci: Material pelindung; Penetrasi radiasi; PHITS; Radiasi pengion; Simulasi Monte Carlo

Citation: To be added by editorial staff during production.

Article Process:

Submitted: date

Accepted: date

Published: date



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access
publication under the terms and
conditions of the Creative Commons
Attribution (CC BY) license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Pendahuluan (Palatino Linotype 12pt)

Radiasi pengion telah dimanfaatkan secara luas dalam berbagai bidang, antara lain kesehatan, industri, penelitian, energi, dan keamanan. Meskipun bentuk dan karakteristik radiasi pengion bervariasi, pemanfaatannya memberikan banyak manfaat, seperti untuk keperluan diagnosis dan terapi, pengujian material, pengukuran, serta pengembangan ilmu pengetahuan. Seiring dengan meningkatnya penggunaan radiasi pengion, upaya perlindungan radiasi menjadi aspek penting untuk memastikan pemanfaatannya tetap aman dan terkendali sehingga perlindungan radiasi menjadi aspek yang sangat penting untuk meminimalkan risiko terhadap manusia dan lingkungan (Safari et al., 2024). Material pelindung digunakan untuk mengurangi paparan radiasi, namun efektivitasnya sangat bergantung pada jenis radiasi dan karakteristik material yang digunakan (Safari et al., 2024). Radiasi alfa, beta, gamma, dan neutron

memiliki sifat fisis serta kemampuan penetrasi yang berbeda ketika berinteraksi dengan material.

Konsep mengenai perbedaan daya tembus radiasi alfa, beta, dan gamma di mana partikel alfa dapat dihentikan oleh kertas, radiasi beta oleh logam tipis, dan radiasi gamma oleh bahan berdensitas tinggi seperti timbal telah lama diajarkan secara luas dalam berbagai buku pembelajaran fisika (Giambattista et al., 2010; Giancoli, 2014). Dalam praktik pemanfaatan radiasi material pelindung seringkali dianggap mampu menghentikan radiasi secara menyeluruh. Namun pada kondisi tertentu radiasi masih dapat melewati material pelindung atau menimbulkan paparan tambahan terutama untuk radiasi dengan daya tembus tinggi seperti gamma dan neutron (Xiao et al., 2023). Oleh karena itu, studi mengenai penetrasi radiasi diperlukan untuk memberikan gambaran yang lebih realistis terkait efektivitas material pelindung.

Pendekatan eksperimental untuk mempelajari penetrasi radiasi umumnya memerlukan biaya tinggi serta fasilitas dan instrumen khusus. Sebagai alternatif, metode simulasi Monte Carlo digunakan untuk memodelkan transport dan interaksi radiasi dengan material secara stokastik, termasuk proses hamburan dan kehilangan energi. Pemanfaatan simulasi Monte Carlo pada berkas foton energi tinggi menunjukkan bahwa karakteristik radiasi dan interaksinya dengan material dapat dianalisis secara rinci tanpa keterbatasan pengukuran eksperimental (Manik et al., 2025). Simulasi Monte Carlo pada partikel bermuatan seperti proton terbukti efektif dalam memodelkan deposisi dosis dan kedalaman penetrasi radiasi di dalam medium homogen (Budiman et al., 2025). Perangkat lunak Particle and Heavy Ion Transport System (PHITS) merupakan salah satu perangkat lunak berbasis Monte Carlo yang mampu mensimulasikan interaksi berbagai jenis radiasi dalam material secara komprehensif (Sato et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan penetrasi radiasi alfa, positron, gamma, dan neutron pada berbagai material pelindung menggunakan PHITS. Simulasi ini dilakukan sebagai studi awal untuk memahami efektivitas material pelindung terhadap masing-masing jenis radiasi berdasarkan perbedaan karakteristik interaksi dan daya tembusnya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi studi lanjutan dalam pengembangan dan evaluasi sistem proteksi radiasi.

2. Studi Literatur (Palatino Linotype 12pt)

Interaksi radiasi dengan materi menentukan perilaku penetrasi radiasi serta pembentukan radiasi hamburan. Ketika radiasi memasuki suatu material, sebagian energinya dapat diserap atau dihamburkan sehingga menghasilkan radiasi yang disebut sebagai radiasi sekunder. Radiasi primer berasal langsung dari sumber, sedangkan radiasi sekunder terbentuk sebagai akibat interaksi radiasi primer dengan material yang dilaluinya. Radiasi sekunder ini dapat berupa berbagai jenis radiasi lain seperti partikel bermuatan, neutron, maupun foton, bergantung pada jenis radiasi primer dan sifat material target (Sato et al., 2024).

Radiasi alfa memiliki daya tembus yang sangat rendah akibat proses ionisasi yang kuat sehingga umumnya dapat dihentikan oleh material tipis seperti kertas atau lapisan permukaan lainnya (Hill & McCreary, 2022). Radiasi beta positif merupakan jenis partikel beta yang berupa positron dan dikenal sebagai antipartikel elektron. Radiasi beta minus merupakan radiasi yang tersusun atas elektron dan umumnya memiliki daya tembus sedang. Positron meskipun muatannya berlawanan menunjukkan karakteristik yang serupa dalam hal energi dan daya tembus di dalam material. Setelah positron melambat di material akan terjadi anihilasi dengan elektron dan akan dihasilkan dua foton gamma berenergi 0,511 MeV yang saling berlawanan arah. Fenomena ini dimanfaatkan pada aplikasi medis seperti Positron Emission Tomography (PET) scan, di mana foton gamma sekunder tersebut digunakan untuk imaging (Podgorsak, 2005).

Radiasi gamma merupakan radiasi elektromagnetik berenergi tinggi, umumnya berada pada rentang energi $\geq 0,1$ MeV hingga beberapa MeV sehingga memiliki daya tembus yang besar dan memerlukan material berdensitas tinggi, seperti timbal atau beton, untuk meredam intensitasnya secara efektif. Radiasi neutron bersifat netral dan berinteraksi langsung dengan inti atom, menyebabkan radiasi ini memiliki daya tembus tinggi dan mekanisme interaksi yang berbeda dibandingkan radiasi bermuatan. Efektivitas material pelindung sangat bergantung pada jenis radiasi yang dihadapi serta karakteristik material pelindung, seperti densitas, nomor atom, dan komposisi kimia. Oleh karena itu, pemilihan material pelindung harus disesuaikan dengan karakteristik radiasi yang dominan (AbuAlRoos et al., 2020). Simulasi Monte Carlo menggunakan PHITS dapat digunakan untuk mempelajari proses penetrasi radiasi dan pembentukan radiasi sekunder secara aman dan sistematis tanpa melakukan eksperimen langsung (Dalumpines et al., 2025).

Flux radiasi merupakan salah satu besaran penting dalam simulasi Monte Carlo yang digunakan untuk menggambarkan jumlah partikel radiasi yang melewati suatu luasan tertentu per satuan waktu. Dalam konteks simulasi transport radiasi flux memberikan informasi mengenai intensitas radiasi yang masih tersedia pada suatu posisi setelah berinteraksi dengan material (Sato et al., 2024). Nilai flux yang tinggi menunjukkan bahwa sejumlah besar partikel masih mampu menembus material, sedangkan penurunan flux mengindikasikan terjadinya penyerapan, hamburan, atau kehilangan energi akibat interaksi dengan material pelindung. Oleh karena itu, analisis flux pada penelitian ini dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas material pelindung dalam mengurangi penetrasi radiasi.

3. Material and Metode (Palatino Linotype 12pt)

Simulasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak PHITS versi 3.35 dengan lisensi resmi yang telah tersedia. PHITS digunakan karena kemampuannya dalam mensimulasikan transport berbagai jenis radiasi pengion

serta pembentukan radiasi sekunder akibat interaksi radiasi dengan material. Pada penelitian ini digunakan parameter $negs=2$ untuk mengaktifkan penelusuran radiasi sekunder yang dihasilkan dari interaksi antara radiasi utama dengan material pelindung. Pengaturan parameter ini memungkinkan simulasi memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap proses penetrasi radiasi.

Jenis radiasi yang disimulasikan meliputi radiasi alfa, positron, gamma, dan neutron. Keempat jenis radiasi tersebut dipilih karena memiliki karakteristik fisis dan kemampuan penetrasi yang berbeda ketika berinteraksi dengan material. Energi awal masing-masing jenis radiasi ditetapkan pada nilai energi yang umum digunakan dan representatif untuk setiap radiasi sehingga perilaku penetrasi yang diperoleh dari simulasi dapat menggambarkan kondisi yang relevan dalam studi perlindungan radiasi.

Energi awal untuk setiap jenis radiasi yang digunakan pada penelitian ini merupakan energi tipikal untuk studi shielding, dosimetri linac, dan partikel sekunder (Quoc & Tuan, 2024). Nilai energi awal ini terdapat pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter jenis dan energi sumber radiasi pada simulasi.

Jenis Radiasi	Energi Radiasi (MeV)
Alfa	8
Positron	0,5
Sinar Gamma	0,3
Neutron	20

Parameter sumber radiasi dalam simulasi ditetapkan sebagai sumber mono-energetik dengan arah pancaran aksial (*mono-energetic axial source*). Sumber radiasi dimodelkan memiliki distribusi berbentuk lingkaran dengan jari-jari sebesar 20 cm sehingga berkas radiasi yang dihasilkan bersifat terarah dan seragam menuju material pelindung. Jumlah sumber radiasi yang disimulasikan adalah 10^8 sumber untuk memperoleh ketelitian statistik yang memadai. Nilai cut-off energi partikel digunakan sesuai pengaturan *default* PHITS. Pengaturan parameter sumber ini bertujuan untuk memastikan kondisi iradiasi yang terkontrol dan konsisten pada setiap simulasi sehingga perbandingan perilaku penetrasi radiasi antar jenis radiasi dan material pelindung dapat dilakukan secara objektif.

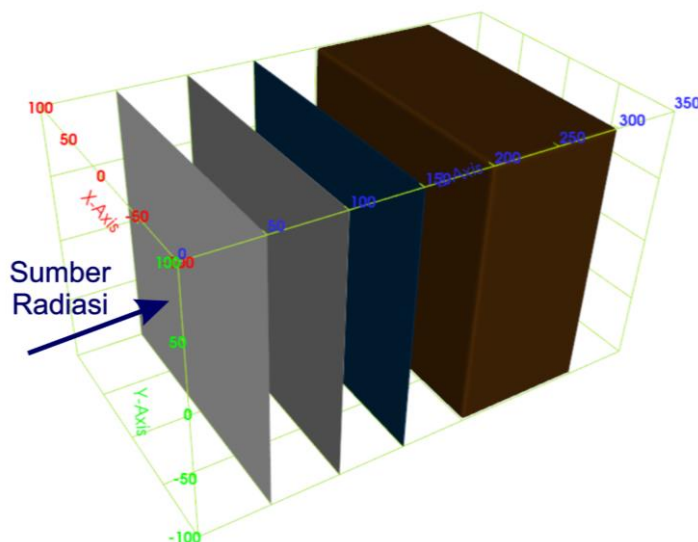
Material pelindung pada penelitian ini ditetapkan berdasarkan ekspektasi dan paradigma umum yang lazim digunakan dalam praktik perlindungan radiasi. Penentuan ketebalan ini dimaksudkan agar material pelindung yang dimodelkan dapat merepresentasikan kondisi perlindungan radiasi yang umum diterapkan dalam aplikasi nyata sehingga hasil simulasi memiliki relevansi praktis. Bahan pelindung, ketebalan, dan densitasnya pada simulasi penelitian ini dijelaskan pada tabel 2.

Tabel 2. tabel parameter simulasi.

Bahan Pelindung	Ketebalan (cm)	Densitas (g/cm ³)
Kertas	0,01	0,9
Aluminum	0,5	2,7
Timbal	1	11,34
Beton	100	2,3

Ketebalan beton 100 cm dipilih sebagai representasi ketebalan dinding bunker radiasi yang lazim digunakan pada fasilitas dengan paparan neutron berenergi tinggi (Podgorsak, 2005).

Geometri simulasi disusun secara sederhana dalam bentuk sistem berlapis yang terdiri dari sumber radiasi, material pelindung, dan detektor. Susunan geometri ini dirancang untuk memudahkan analisis penetrasi radiasi serta pengamatan radiasi yang masih mampu menembus material pelindung setelah berinteraksi dengan material tersebut. Simulasi dilakukan secara terpisah untuk setiap jenis radiasi dengan menggunakan geometri materi yang sama. Sumber radiasi diarahkan menuju material pelindung dengan energi yang telah ditentukan untuk masing-masing jenis radiasi sehingga perbedaan perilaku penetrasi yang diamati semata-mata dipengaruhi oleh karakteristik radiasi dan sifat material pelindung. Pada lintasan radiasi, material pelindung disusun secara berurutan berupa kertas, aluminium, timbal, dan beton. Di antara setiap lapisan material pelindung tersebut disisipkan medium udara. Geometri simulasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Geometri simulasi yang digunakan dalam pemodelan penetrasi radiasi pada material pelindung.

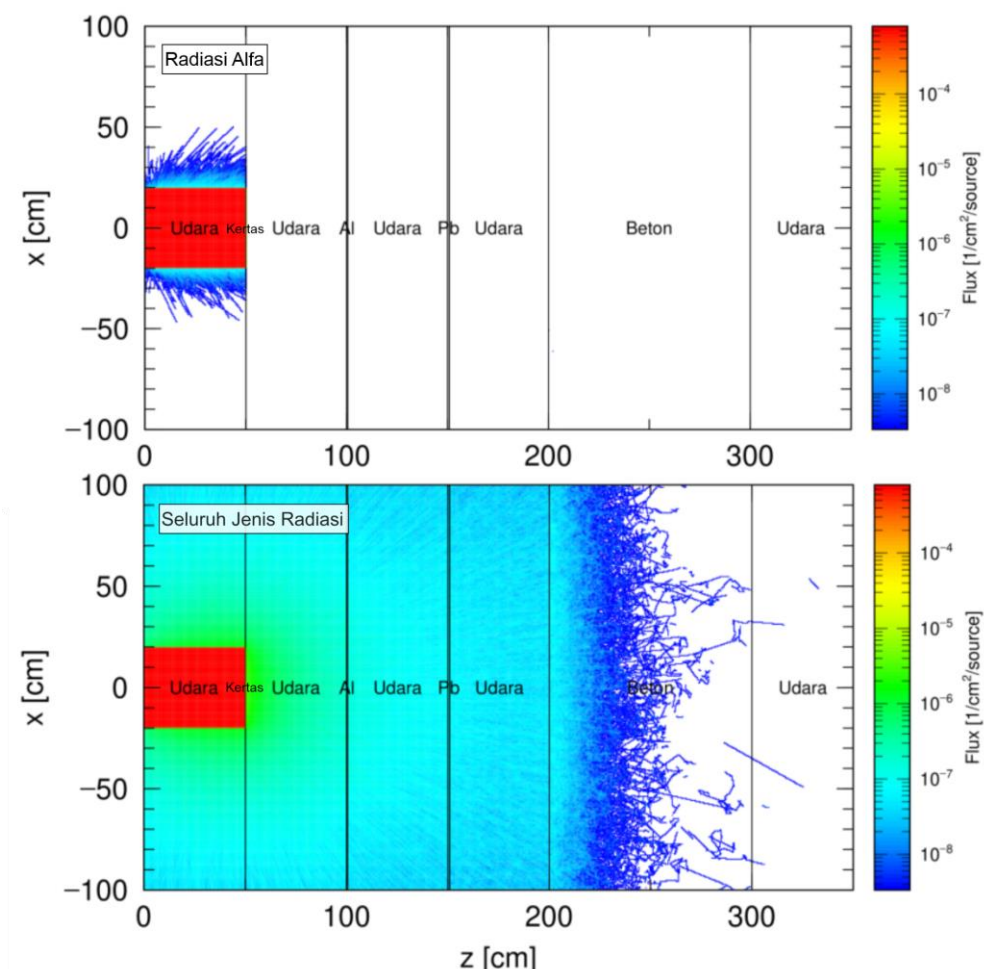
Lintasan partikel disimulasikan dan divisualisasikan menggunakan tally T-Track untuk menggambarkan proses penetrasi radiasi di dalam material. Untuk setiap jenis sumber radiasi, dihasilkan peta flux dua dimensi sebagai representasi distribusi spasial radiasi. Selanjutnya, hasil simulasi dianalisis secara dengan

membandingkan nilai flux sebelum dan sesudah radiasi menembus material pelindung. flux yang dianalisis meliputi kontribusi radiasi primer serta kombinasi radiasi primer dan sekunder. Perbandingan antara flux sebelum dan sesudah menembus material digunakan untuk mengevaluasi tingkat penetrasi radiasi serta efektivitas material pelindung terhadap masing-masing jenis radiasi.

4. Hasil

4.1 Penetrasi Alfa

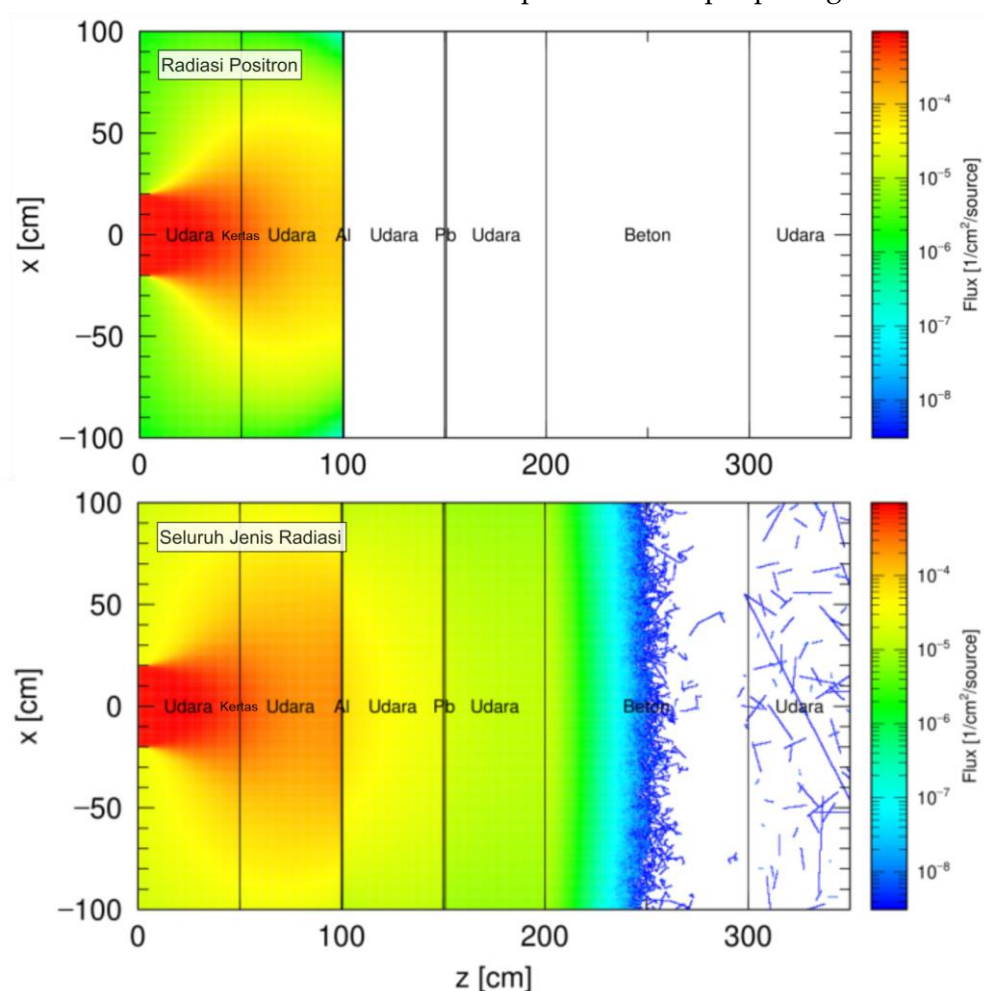
Berdasarkan hasil simulasi, radiasi alfa menunjukkan daya tembus yang sangat rendah sehingga seluruh partikel alfa terhenti sepenuhnya oleh lapisan kertas. Meskipun demikian interaksi partikel alfa dengan material kertas menghasilkan radiasi sekunder berupa neutron dan foton. Radiasi sekunder ini masih terdeteksi hingga mencapai lapisan beton, namun dengan intensitas yang sangat kecil. Nilai flux radiasi sekunder yang terukur berada pada orde $\sim 10^{-7}$ per cm^2 per sumber yang menunjukkan bahwa kontribusinya terhadap sebaran total bersifat sangat minor dan dapat diabaikan dalam konteks proteksi radiasi. Peta distribusi flux radiasi hasil simulasi sumber alfa terdapat pada gambar 2.



Gambar 2. Distribusi flux radiasi hasil simulasi sumber alfa.

4.2 Penetrasi Positron

Radiasi positron menunjukkan interaksi yang signifikan dengan udara sehingga terbentuk sebaran lateral positron di medium udara meskipun partikel tersebut belum mencapai lapisan kertas. Setelah mencapai kertas, sebagian positron masih mampu menembus material tersebut dan selanjutnya kembali tersebar di udara. Namun demikian, positron tidak mampu menembus lapisan aluminium, yang ditunjukkan oleh tidak terdeteksinya flux partikel di belakang material aluminium. Selain itu, interaksi positron dengan udara, kertas, dan aluminium menghasilkan radiasi sekunder. Radiasi sekunder yang terbentuk didominasi oleh foton, yang memiliki daya tembus lebih tinggi dan masih dapat mencapai lapisan beton dengan nilai flux sekitar $\sim 10^{-5}$ per cm^2 per sumber. Peta distribusi flux radiasi hasil simulasi sumber positron terdapat pada gambar 3.

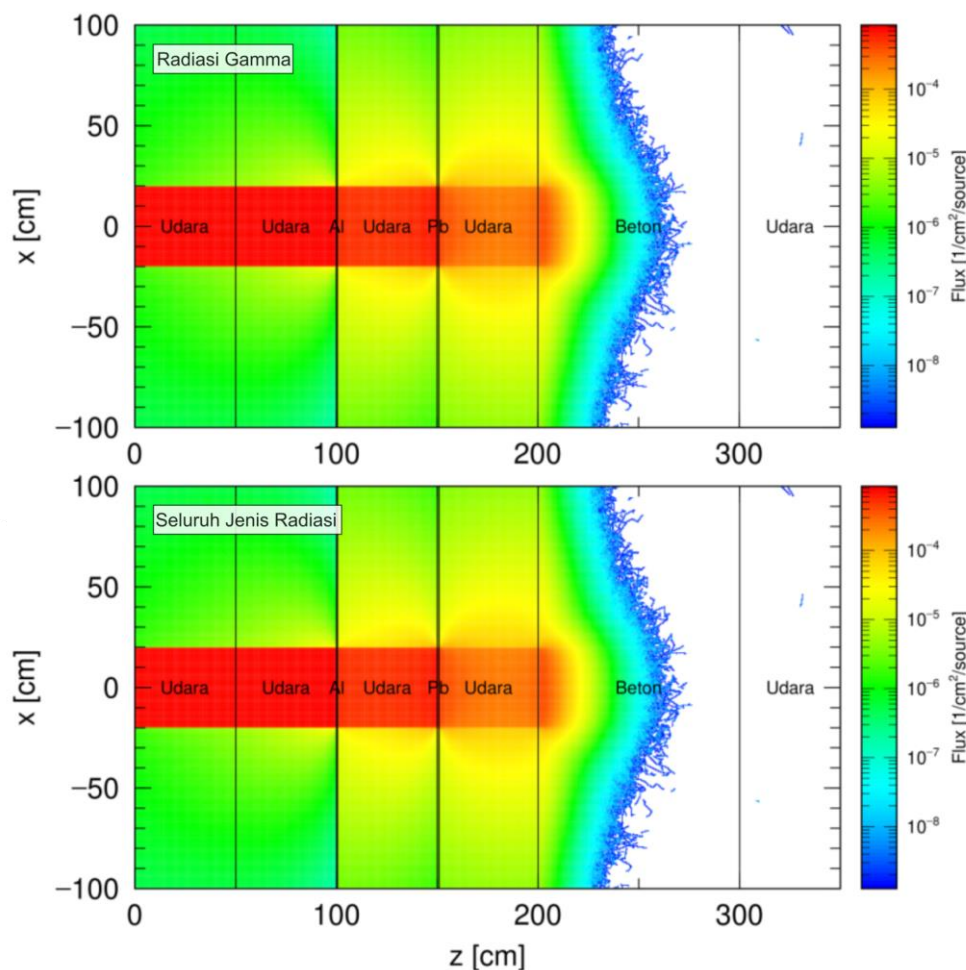


Gambar 3. Distribusi flux radiasi hasil simulasi sumber positron.

4.3 Penetrasi Gamma

Radiasi gamma menunjukkan kemampuan penetrasi yang jauh lebih besar dibandingkan radiasi alfa dan positron. Berdasarkan perbandingan antara flux radiasi gamma sebelum dan sesudah melewati material pelindung, aluminium dengan ketebalan 0,5 cm mampu mereduksi flux sekitar $\sim 30\%$. Timbal setebal 1

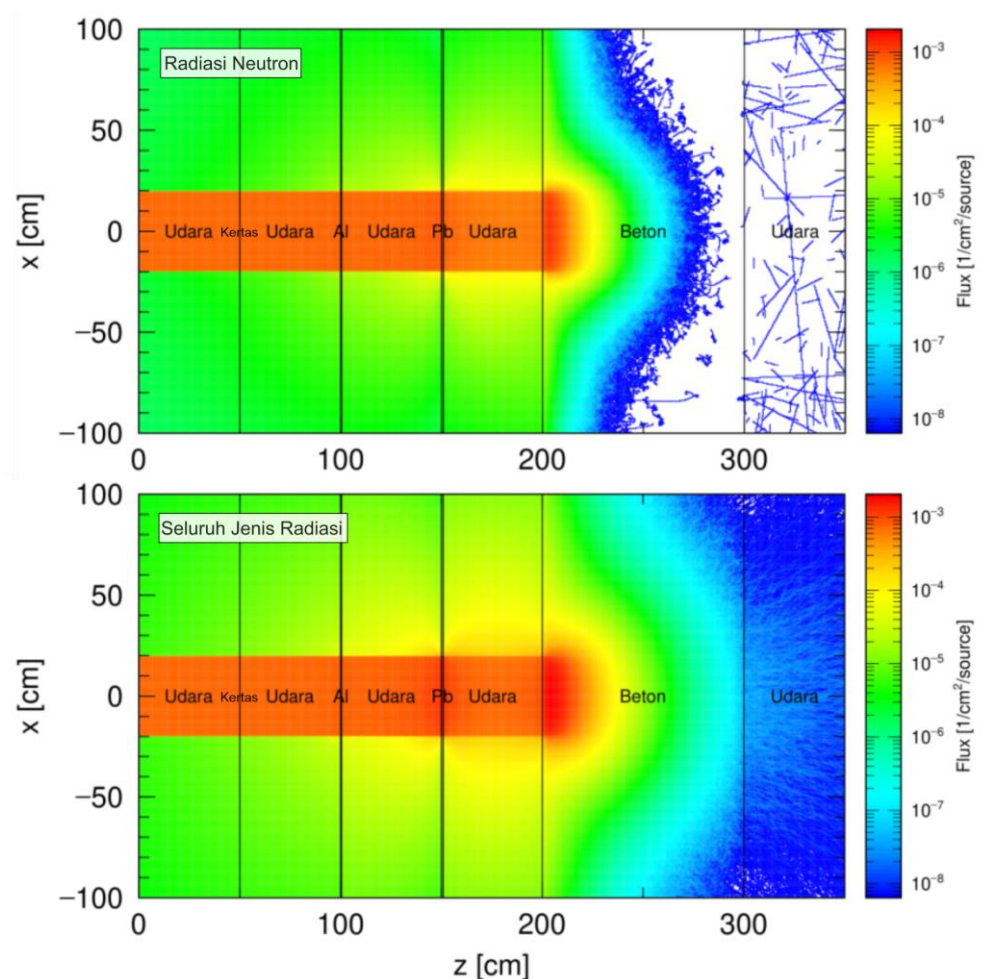
cm memberikan penurunan yang lebih signifikan yakni sekitar ~56% setelah radiasi berinteraksi dengan pelindung. Interaksi radiasi gamma dengan material pelindung menghasilkan radiasi sekunder yang terdeteksi di materi pelindung. Radiasi sekunder tersebut didominasi oleh foton yang tersebar secara lateral dengan nilai flux sekitar $\sim 10^{-4}$ per cm^2 per sumber. Kontribusi elektron pada radiasi sekunder ini bernilai flux pada orde $\sim 10^{-7}$ per cm^2 per sumber. Peta distribusi flux radiasi hasil simulasi sumber sinar gamma terdapat pada gambar 4.



Gambar 4. Distribusi flux radiasi hasil simulasi sumber sinar gamma.

4.4 Penetrasi Neutron

Radiasi neutron memperlihatkan daya tembus paling tinggi di antara seluruh jenis radiasi yang disimulasikan. Meskipun demikian radiasi neutron primer tidak terdeteksi mampu menembus lapisan beton dengan ketebalan 100 cm. Interaksi neutron dengan material beton menghasilkan radiasi sekunder berupa foton yang tersebar ke segala arah. Radiasi sekunder ini masih dapat menembus beton namun intensitasnya sangat rendah. Intensitas yang sangat rendah ini ditunjukkan oleh nilai flux pada orde $\sim 10^{-7}$ per cm^2 per sumber. Peta distribusi flux radiasi hasil simulasi sumber neutron terdapat pada gambar 5.



Gambar 5. Distribusi flux radiasi hasil simulasi sumber neutron.

5. Diskusi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penetrasi radiasi alfa, positron, gamma, dan neutron pada berbagai material pelindung sangat ditentukan oleh karakteristik fisis masing-masing radiasi serta mekanisme interaksinya dengan materi. Perbedaan daya tembus yang teramati pada kertas, aluminium, timbal, dan beton mencerminkan variasi proses interaksi dasar, seperti ionisasi, hamburan, penyerapan, dan reaksi inti, yang bekerja secara dominan pada tiap jenis radiasi. Simulasi ini berhasil memberikan gambaran awal mengenai efektivitas material pelindung terhadap masing-masing jenis radiasi. Temuan ini mendukung pemanfaatan hasil simulasi sebagai landasan untuk studi lanjutan dalam pengembangan dan evaluasi sistem proteksi radiasi yang lebih komprehensif.

Terhentinya radiasi alfa sepenuhnya pada lapisan kertas menegaskan daya tembusnya yang sangat rendah akibat proses ionisasi yang kuat. Temuan ini mengonfirmasi konsep dasar yang telah lama diajarkan dalam literatur fisika bahwa partikel alfa dapat dihentikan oleh material tipis seperti kertas. Hasil simulasi juga menunjukkan terbentuknya radiasi sekunder akibat interaksi partikel alfa dengan kertas. Meskipun intensitasnya sangat kecil radiasi sekunder

ini masih mampu menembus kertas. Hal ini menunjukkan sebuah aspek yang umumnya tidak dibahas secara eksplisit dalam literatur konsep dasar yang hanya berfokus pada radiasi primer.

Radiasi positron tidak mampu menembus lapisan aluminium. Hal ini sejalan dengan konsep dasar yang menyatakan bahwa radiasi beta dapat dihentikan oleh logam tipis. Namun interaksi positron dengan aluminium dan udara di sekitarnya menghasilkan radiasi sekunder terutama berbentuk foton. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun material pelindung efektif dalam menghentikan radiasi primer, proses interaksi radiasi terhadap materi tetap dapat menimbulkan tambahan radiasi sekunder yang dapat menembus lebih lanjut.

Simulasi penetrasi radiasi gamma menunjukkan bahwa material pelindung tidak berfungsi sebagai penghalang sempurna bagi radiasi berenergi tinggi. Meskipun aluminium dan timbal mampu menurunkan flux radiasi gamma secara signifikan, sebagian radiasi tetap dapat menembus material tersebut. Temuan ini menegaskan bahwa efektivitas pelindung radiasi gamma bersifat relatif dan sangat bergantung pada jenis material serta ketebalannya sehingga pendekatan proteksi radiasi untuk foton berenergi tinggi harus mempertimbangkan konsep atenuasi, bukan penghentian total.

Radiasi neutron menunjukkan bahwa neutron memiliki daya tembus yang tinggi dan mekanisme peredamannya sangat bergantung pada sifat material yang digunakan. Interaksi neutron yang didominasi oleh tumbukan dengan inti atom dan reaksi inti menyebabkan efektivitas pelindung sangat dipengaruhi oleh komposisi material. Hasil simulasi juga menunjukkan terbentuknya radiasi sekunder berupa foton akibat interaksi neutron dengan beton. Radiasi sekunder ini masih mampu menembus beton meskipun dengan intensitas yang sangat kecil. Hal ini menegaskan bahwa meskipun radiasi neutron primer dapat diredam secara efektif oleh beton, kontribusi radiasi sekunder tetap perlu dipertimbangkan dalam analisis proteksi radiasi.

Meskipun simulasi ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan pengukuran eksperimental, pendekatan Monte Carlo memberikan gambaran yang aman, efisien, dan informatif dalam memahami perilaku penetrasi radiasi pada material pelindung. Studi lanjutan dapat dilakukan dengan mengkaji pengaruh variasi energi radiasi dan ketebalan material pelindung terhadap efektivitas peredaman. Analisis kuantitatif yang lebih mendalam terhadap radiasi sekunder perlu dilakukan untuk mengevaluasi kontribusinya secara lebih akurat dalam konteks proteksi radiasi dan perancangan sistem pelindung radiasi yang optimal.

6. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kemampuan penetrasi radiasi sangat bergantung pada jenis radiasi dan material pelindung yang digunakan. Radiasi alfa dan beta dapat diredam secara efektif oleh material tipis, sedangkan radiasi gamma dan neutron memerlukan material dengan densitas dan ketebalan yang lebih besar untuk menurunkan flux radiasi secara signifikan. Interaksi radiasi dengan material pelindung menghasilkan radiasi tambahan dengan intensitas

relatif kecil. Simulasi Monte Carlo menggunakan PHITS terbukti efektif dalam menggambarkan perilaku penetrasi radiasi dan dapat digunakan sebagai dasar untuk studi lanjutan dalam bidang proteksi radiasi.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rizki Budiman atas dukungan berupa penyediaan perangkat keras komputer dan lisensi PHITS yang digunakan dalam penelitian ini.

Referensi

- AbuAlRoos, N. J., Baharulrazi, N., Shah, N., & Ghalib, R. M. F. (2020). Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 170, 108620. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108620>
- Budiman, R., Sutanto, H., Tursinah, R., & Triadyaksa, P. (2025). Dose distribution of pencil beam proton therapy using Geant4 simulation for breast cancer treatment. *Journal of Physics and Its Applications*, 7(2), 48–53. <https://doi.org/10.14710/jpa.v7i2.25067>
- Dalumpines, C. G. M., Peñonal, G. F. I., Aringa, H. P., & Convicto, V. C. (2025). PHITS-based simulation of dose distributions and secondary particle fluence in water phantom for therapeutic ions. *Atom Indonesia*, 51(3), 215–220. <https://doi.org/10.55981/aij.2025.1643>
- Giambattista, A., Richardson, B. M., & Richardson, R. C. (2010). *Physics* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Giancoli, D. C. (2014). *Physics: Principles with applications* (7th ed.). Pearson Education.
- Hill, G. C., & McCreary, E. E. (2022). *Chemistry for changing times* (15th ed.). Pearson.
- Manik, J. T., Okselia, A., Junios, Margaretha, A., & Haryanto, F. (2025). Evaluation of 6 MV photon beam characteristics on Varian Clinac iX: A Monte Carlo study. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 14(1), 227–234. <https://doi.org/10.11591/ijaas.v14.i1.pp227-234>
- Podgorsak, E. B. (Ed.). (2005). *Radiation oncology physics: A handbook for teachers and students*. International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Quoc, S. D., Fujibuchi, T., Arakawa, H., & Hamada, K. (2024). Photon and neutron dose estimation using Monte Carlo simulation in a TrueBeam 10 MV photon chamber. *Journal of Medical Physics*, 49(3), 473–479. https://doi.org/10.4103/jmp.jmp_70_24
- Safari, A., Rafie, P., Taeb, S., Najafi, M., & Mortazavi, S. M. J. (2024). Development of lead-free materials for radiation shielding in medical settings: A review. *Journal of Biomedical Physics & Engineering*, 14(3), 229–244. <https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.2404-1742>
- Sato, T., Furuta, T., Hashimoto, S., Kai, T., Kimura, A., Kodaira, S., ... Niita, K. (2024). Features of particle and heavy ion transport system (PHITS) version 3.35. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 61, 127–135. <https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2273773>

Xiao, M., Qin, Q., He, X., Li, F., & Wang, X. (2023). Shielding capability research on composite base materials in hybrid neutron–gamma mixed radiation fields. *Materials*, 16(5), 2084. <https://doi.org/10.3390/ma16052084>