

# **SIMULASI SERAPAN PADA MATERIAL BIOPLASTIK DENGAN PENGISI *STRONTIUM TITANATE* ( $\text{SrTiO}_3$ ) SEBAGAI APRON PERISAI RADIASI DENGAN MENGGUNAKAN PHITS 3.30**

**Ari Putra Pamungkas\*, Dwi Satya Palupi**

*Universitas Gadjah Mada*

\*Corresponding author: ari.p.p@mail.ugm.ac.id

## **ABSTRAK**

*Telah dilakukan simulasi pada material bioplastik dengan pengisi  $\text{SrTiO}_3$  untuk mendapatkan bahan apron. Material bioplastik polimer mudah dijumpai, mudah dibentuk, dan bersifat juga dapat diisi dengan material pengisi lain sehingga efektif untuk dijadikan bahan alternatif dalam pembuatan apron perisai radiasi. Pada penelitian ini simulasi dilakukan dengan software PHITS*

*3.30. Sumber radiasi berupa foton sinar-X dengan tenaga maksimal 30 keV. Sumber radiasi ditembakkan pada target material bioplastik kemudian dihitung nilai fluks dan dosis yang terdeteksi pada target. Tingkat efektivitas bahan bioplastik diuji dengan melakukan variasi ketebalan pada target apron pada masing-masing isian bahan yang digunakan sehingga didapatkan ketebalan maksimal yang dapat ditembus sinar-X. Variasi material target yang digunakan adalah  $\text{CMC}+\text{AM}+\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{CMC}+\text{AM}+\text{Sr}$ ,  $\text{CMC}+\text{AM}$ ,  $\text{CMC}$ ,  $\text{AM}$ ,  $\text{Sr}$ , dan  $\text{SrTiO}_3$  dengan komposisi  $\text{CMC}+\text{AM}+\text{SrTiO}_3$  sebagai material target utama yang diteliti. Material target yang terdiri dari  $\text{SrTiO}_3$  dengan rapat jenis  $4,81 \text{ g/cm}^3$  merupakan material paling efektif dikarenakan memiliki tingkat ketebalan paling kecil di antara material lain yakni  $0,23 \text{ cm}$ . Material target utama dengan rapat jenis  $1,95 \text{ g/cm}^3$  memerlukan tebal  $1,5 \text{ cm}$  agar radiasi yang diterima tidak menembus material target tersebut. Hasil penelitian menunjukkan material target dengan nilai rapat jenis yang besar akan lebih efektif dalam menahan radiasi yang diterima. Hal tersebut terjadi karena nilai rapat jenis akan mempengaruhi daya tembus suatu radiasi akibatnya interaksi radiasi dengan materi akan terpengaruh apabila suatu bahan material memiliki nilai rapat jenis yang berbeda.*

Kata kunci : bioplastik, perisai radiasi, sumber radiasi.

## **PENDAHULUAN**

Sumber Radiasi diartikan sebagai sesuatu yang dapat menimbulkan paparan radiasi. Sumber radiasi tersebut meliputi zat radioaktif dan peralatan yang mengandung zat radioaktif atau peralatan yang dapat memproduksi atau menghasilkan radiasi, dan fasilitas yang di dalamnya terdapat zat radioaktif (Presiden Republik Indonesia, 2007). Pemanfaatan sumber radioaktif untuk radiografi atau fasilitas penelitian dan pengembangan banyak dilakukan pada lembaga pendidikan tinggi maupun sekolah. Kegiatan pemanfaatan tersebut dapat menyebabkan pekerja radiasi dan lingkungannya terpapar radiasi yang digunakan. Adanya interaksi radiasi eksternal maupun kontaminasi internal dari dalam tubuh pekerja radiasi dapat menimbulkan efek yang secara biologis akan muncul dengan sifat dan tingkat keparahan yang berbeda dengan waktu kemunculan yang berbeda

pula berdasarkan besar radiasi yang diterima oleh pekerja radiasi. Untuk melakukan aktivitas-aktivitas pemanfaatan sumber radioaktif dengan aman diperlukan perlindungan atau proteksi radiasi yang sesuai (Martin *et al.*, 2012).

Pekerja radiasi dan lingkungan di sekitarnya memerlukan perlindungan dari bahaya paparan radiasi agar keselamatan diri dan sekitarnya terjamin. Paparan radiasi yang diterima manusia memiliki batas ketentuan yang berbeda-beda tergantung pada profesi atau posisi pekerjaan perorangan tersebut dalam memanfaatkan suatu sumber radiasi. Paparan radiasi sangat erat dengan perhitungan dosis radiasi yang diterima oleh manusia yang terpapar radiasi. Dosis radiasi yang diterima oleh manusia tidak diperbolehkan melebihi batas ketentuan- ketentuan yang berlaku berdasarkan standar dari organisasi internasional dan/atau organisasi atau lembaga nasional yang bertugas sebagai pengawas dalam penggunaan dan pemanfaatan radiasi, yaitu ICRP. *Internasional Commission on Radiological Protection* (ICRP) sebagai organisasi internasional yang mengawasi dalam hal pemanfaatan radiasi telah menetapkan rekomendasi nilai batas dosis radiasi dari masing-masing jenis sumber radioaktif. Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) sebagai lembaga nasional yang mengawasi segala kegiatan dalam hal pemanfaatan tenaga nuklir harus menyesuaikan dan menetapkan nilai batas dosis yang dapat diterima oleh manusia apabila terpapar radiasi sebagaimana rekomendasi yang telah dikeluarkan oleh ICRP (Presiden Republik Indonesia, 1997; Martin *et al.*, 2012). Baik ICRP dan BAPETEN telah menetapkan standar atau batas dosis maksimal yang dapat diterima oleh terpapar radiasi.

Pada kasus sumber radiasi berupa radiasi eksternal, pengendalian radiasi dapat dilakukan dengan 3 macam cara, yakni mengatur waktu, jarak, dan menggunakan perisai (Turner, 2007; Ahmed, 2015). Pengendalian jarak dimaksudkan mengatur agar pekerja radiasi tidak terlalu dekat dengan sumber radiasi atau berada pada jarak yang aman terhadap radiasi. Semakin jauh jarak antara pekerja radiasi dengan sumber maka akan semakin kecil dosis radiasi yang diterima. Pengendalian waktu yakni mengatur jam kerja pekerja radiasi agar tidak menerima dosis melebihi batas yang telah ditentukan dalam jangka waktu tertentu. Semakin lama terkena paparan radiasi maka akan semakin besar dosis

yang diterima oleh pekerja radiasi. Sedangkan penggunaan perisai atau pelindung berupa berupa pemakaian alat pelindung diri yang terbuat dari material tertentu untuk dapat menyerap radiasi yang dipancarkan oleh suatu sumber radiasi.

Pelindung radiasi merupakan alat yang tidak kalah penting dalam hal menjaga keselamatan diri pekerja radiasi dalam pemanfaatan radiasi. Pengaturan material atau bahan untuk membuat pelindung juga tidak sembarangan. Selain itu, pemilihan material yang akan digunakan sebagai bahan perisai atau pelindung harus disesuaikan dengan jenis sumber radioaktif yang digunakan. Masing-masing jenis radiasi memiliki daya tembus yang berbeda sehingga sangat dimungkinkan bahan material yang digunakan sebagai pelindung memiliki efektifitas yang berbeda pula.

Material timbal (Pb) merupakan bahan terbaik yang sangat efektif dalam pembuatan perisai atau pelindung untuk radiasi sinar-X (Turner, 2007). Penggunaan timbal sebagai bahan pelindung sangat umum digunakan di laboratorium yang memanfaatkan radiasi (Ahmed, 2015). Beberapa penelitian yang telah dilakukan mengungkapkan bahwa penggunaan bahan timbal sebagai perisai hanya membutuhkan ketebalan yang cukup kecil untuk mendapatkan nilai dosis sekecil mungkin pada tenaga maksimum tertentu. Namun, apabila tenaga dari sumber radiasi dinaikkan dan terus meningkat maka efektifitas timbal sebagai perisai atau pelindung akan berkurang. Penggunaan timbal sebagai perisai atau pelindung radiasi akan menimbulkan kesulitan apabila dibutuhkan ketebalan yang makin besar. Selain harganya yang mahal, material timbal yang cukup berat menjadikan keterbatasan timbal sebagai bahan perisai (Budiawan *et al.*, 2019). Maka, perlu dicari material lain sebagai alternatif yang dapat digunakan sebagai bahan pembuatan perisai radiasi yang murah dan ringan.

Salah satu contoh material bioplastik polimer yang mudah dijumpai adalah *Carboxymethyl Cellulose* (CMC). Material CMC mudah larut dalam pelarut air dan bahan organik sehingga dapat dengan mudah dibentuk dan bersifat ringan. Adanya gugus  $-COONa$  dan  $-OH$  membuat struktur CMC dapat membentuk ikatan kompleks dengan polimer lain dan dapat diisi dengan material pengisi lainnya (Morsi *et al.*, 2021). Untuk pembuatan apron perisai radiasi maka diperlukan bahan pengisi yang mampu menahan radiasi dengan material yang

memiliki densitas yang tinggi. *Strontium titanate* ( $\text{SrTiO}_3$ ),  $\text{BaTiO}_3$ , dan  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) dapat digunakan sebagai bahan pengisi tersebut dikarenakan strontium (Sr), barium (Ba), dan bismut (Bi) memiliki nomor atom yang tinggi. Bahan material dengan nomor atom dan densitas yang tinggi efektif untuk digunakan sebagai bahan pembuat apron perisai radiasi. Pada akhirnya, material bioplastik dengan bahan pengisi  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ , dan  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  diharapkan dapat digunakan sebagai alternatif dalam pembuatan apron perisai radiasi yang murah dan ringan.

Gürel Özdemir *et al.* (2023) melakukan studi evaluasi perisai radiasi sinar gamma dengan material komposit barit yang didoping dengan bismut (Bi). Sumber radioaktif yang mengemisikan foton dengan tenaga 276,4–1332,5 keV dikenakan pada sampel polimer komposit BaBi0, BaBi10, BaBi20, BaBi30, BaBi40, dan BaBi50. Pada tenaga foton yang semakin tinggi, dibutuhkan material perisai yang juga semakin tebal. Apabila komposisi Bi bertambah, maka tebal material berkurang. Pada tenaga 276,4 keV material BaBi0 memiliki HVL 1,5445 cm sedangkan material BaBi50 dengan HVL 0,7442 cm.

Hannachi *et al.* (2023) menganalisis perisai radiasi berbahan  $\text{SrTiO}_3$  (STO) yang didoping dengan menggunakan  $\text{WO}_3$  nanowires dengan beberapa konsentrasi ( $x = 0,0; 2,0; 5,0; 10,0$  wt%). Hasil didapatkan nilai koefisien atenuasi linier (*linear attenuation coefficient* -LAC) untuk STO adalah paling rendah jika dibandingkan dengan STO yang didoping dengan  $\text{WO}_3$  NWs. Nilai *radiation protection efficiency* (RPE) pada tenaga 0,06 MeV hampir 100% untuk STO tanpa penambahan  $\text{WO}_3$  NWs dan dapat diartikan sampel tersebut efisien pada tenaga rendah dan dapat menghentikan foton pada rentang tenaga tersebut.

Alzahrani *et al.* (2022) melakukan pengukuran pada sampel *zinc borotellurite glass* yang mengandung strontium oksida (SrO) pada berbagai macam fraksi molar dari  $x = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; \text{ dan } 0,05$  dengan teknik pendinginan lelehan (*melt-quenching*) konvensional. Penambahan SrO pada beberapa macam fraksi mol (ditulis: 0,01SrO dan seterusnya) sebagai dopan pada sampel *zinc borotellurite glass* mempengaruhi koefisien atenuasi sampel pada tingkat tenaga foton tertentu. Nilai HVL paling kecil diperoleh pada 0,05SrO dengan demikian material tersebut merupakan material yang paling baik sebagai perisai radiasi.

Penelitian ini akan dilakukan dengan simulasi komputasi pada bahan bioplastik dengan bahan pengisi SrTiO<sub>3</sub> menggunakan *software* PHITS 3.30. Sumber radiasi yang digunakan adalah sinar-X dengan tenaga maksimal 30 keV. Radiasi dari sumber diasumsikan ditembakkan pada material target yang akan digunakan untuk apron perisai radiasi. Hasil dari simulasi komputasi berupa besaran nilai fluks dan dosis yang terdeteksi pada material target. Variasi ketebalan pada target apron berperan untuk meninjau tingkat efektivitas bahan bioplastik pada masing-masing isian bahan yang digunakan. Penelitian ini diharapkan mampu mendapatkan bahan material lain sebagai alternatif yang memiliki efektivitas hampir sama atau sama dengan material timbal (Pb) sehingga dapat digunakan sebagai bahan material untuk membuat apron perisai radiasi.

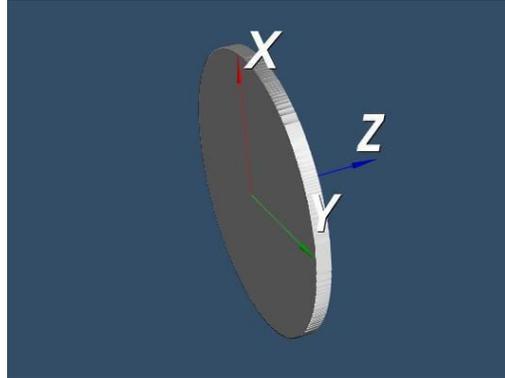
## METODE

Penelitian ini menggunakan piranti perangkat keras dan perangkat lunak dan menggunakan metode simulasi komputasi. Perangkat keras yang digunakan berupa laptop Asus E410MA RAM 4GB dengan sistem operasi windows 11 dan perangkat lunak berupa program PHITS versi 3.30, Notepad++, Microsoft Office (Word dan Excel), serta data tampang lintang yang diambil dari pustaka data *Talys Evaluated Nuclear Data Library* (TENDL) 2019.

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Membuat desain geometri baik geometri sumber radiasi sinar-X maupun geometri target yaitu apron perisai radiasi. Target apron radiasi merupakan material bioplastik dengan diisi dengan SrTiO<sub>3</sub> dengan berbagai asumsi ketebalan.
2. Membuat simulasi dengan program PHITS berdasarkan desain geometri dan jenis partikel yang dideteksi. Simulasi dengan menggunakan PHITS dilakukan untuk mendapatkan nilai tebal maksimal target dan komposisi material yang tepat agar radiasi dari sumber tidak menembus material target. Nilai tebal maksimal ditentukan dari nilai fluks partikel yang dideteksi. Pemodelan ditulis pada aplikasi Notepad++.

3. Menganalisis hasil simulasi yang berupa tebal material dan nilai fluks partikel hasil untuk masing-masing material target dari sumber radiasi foton sinar-X dengan tenaga maksimal 30 keV.



Gambar 1. Model geometri penelitian

Geometri model pada simulasi ditunjukkan pada Gambar 1. Material target yang digunakan yakni CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub>, CMC+AM+Sr, CMC+AM, CMC, AM, Sr, dan SrTiO<sub>3</sub> dimodelkan dalam bentuk silinder yang diletakkan pada koordinat kartesian dengan pusat (0,0,0). Berkas penembak foton ditembakkan secara langsung tegak lurus dengan permukaan tutup silinder sebelah kiri tepat pada koordinat pusatnya silinder (0,0,0) dengan jari-jari berkas foton yakni 0,01 cm. Ketebalan material target divariasikan dengan membuatnya menjadi 10 lapis bentuk silinder kecil di dalam ruang silinder utama dengan masing-masing tebal lapisnya adalah 10 cm. Setelah didapatkan perkiraan fluks foton menembus sejauh beberapa sentimeter, kemudian silinder dibuat menjadi 1 lapis dalam silinder utama dengan ketebalan disesuaikan pada fluks yang menembus pada masing-masing material target yang disimulasikan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah diperoleh data tebal maksimal material target yang ditembak foton sinar-X dengan tenaga maksimal 30 keV seperti pada Tabel 1. Terlihat perbedaan tingkat ketebalan dari masing-masing material target dengan komposisi atom penyusun yang berbeda pula. Rapat jenis yang bermacam-macam tampak juga mempengaruhi tebal maksimal pada material target yang diteliti.

Tabel 1. Data ketebalan pada material target dengan sumber foton sinar-X 30 keV

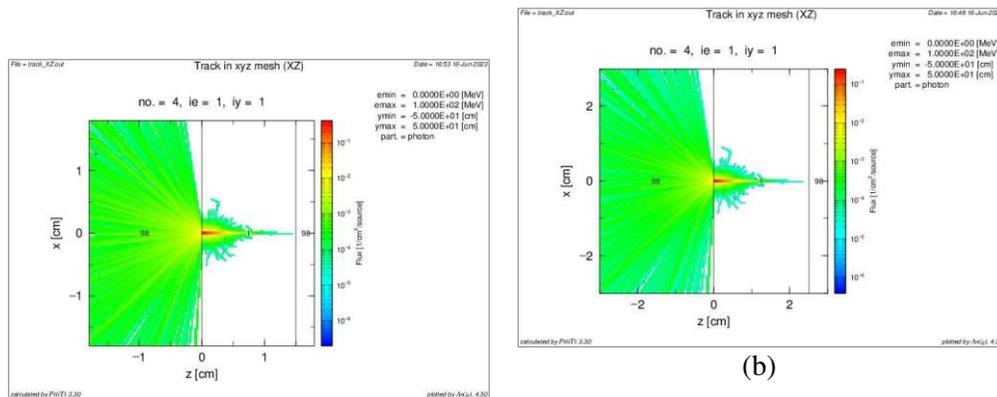
No.	Material	Rapat Jenis ( $\text{g/cm}^3$ )	Tebal (cm)
1	CMC+AM+SrTiO <sub>3</sub>	1,2044	2,5
		1,95	1,5
2	CMC+AM+Sr	1,95	1,4
		1,2044	2,3
3	CMC+AM	1,1359	37
		1,605	26
4	CMC	1,60	26
5	AM	1,61	27
6	Sr	2,64	0,23
7	SrTiO <sub>3</sub>	4,81	0,23

Material dengan komposisi strontium (Sr) murni dan strontium titanat (SrTiO<sub>3</sub>) memiliki tebal paling kecil atau paling tipis jika dibandingkan dengan material lain yang diteliti. Keduanya memiliki ketebalan 0,23 cm untuk dapat menahan radiasi foton sinar-X agar tidak menembus material dan dapat digunakan sebagai apron perisai radiasi. Pada material campuran CMC+AM memiliki tingkat ketebalan paling tinggi jika dibandingkan dengan material lain yang diteliti. Untuk dapat menahan foton sinar-X agar tidak dapat menembus, material tersebut memerlukan tebal hingga 37 cm agar dapat digunakan sebagai apron perisai radiasi. Material target utama dengan komposisi CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub> memerlukan ketebalan 2,5 cm dengan rapat jenis 1,2044  $\text{g/cm}^3$  dan 1,5 cm dengan rapat jenis 1,95  $\text{g/cm}^3$  untuk menahan radiasi foton sinar-X agar tidak menembus.

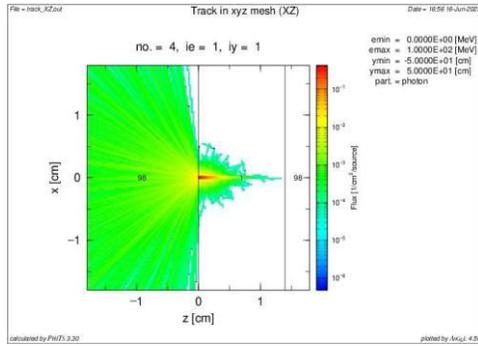
Material target utama CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub> dengan rapat jenis 1,95  $\text{g/cm}^3$  lebih bagus dan lebih baik apabila digunakan sebagai apron perisai radiasi dikarenakan memiliki ketebalan lebih tipis daripada CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub> dengan rapat jenis 1,2044  $\text{g/cm}^3$ . Berdasarkan hasil-hasil di atas, dapat terlihat bahwa material bioplastik dengan pengisi SrTiO<sub>3</sub> dapat digunakan untuk apron perisai radiasi. Lain halnya apabila material bioplastik saja masih belum dapat untuk digunakan sebagai apron perisai radiasi dikarenakan memerlukan ketebalan yang tinggi untuk dapat menahan radiasi foton agar tidak menembus material tersebut. Hal demikian kurang efektif untuk kemudian dijadikan pertimbangan material

bioplastik dapat digunakan sebagai apron perisai radiasi namun harus dengan pengisi seperti SrTiO<sub>3</sub>.

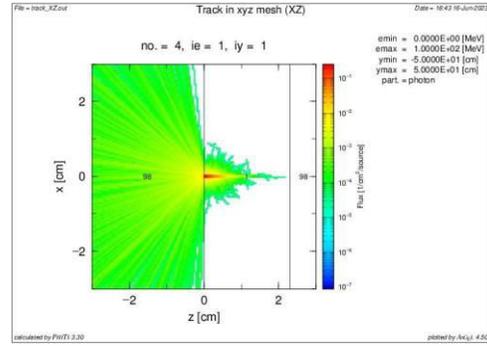
Untuk dapat menahan radiasi yang ditembakkan pada material target, maka material target harus mempunyai komposisi atom dengan nomor atom besar dan memiliki nilai rapat jenis yang besar pula. Nomor atom penyusun dan rapat jenis material merupakan kombinasi untuk mendapatkan suatu material yang dapat menahan radiasi, seperti halnya radiasi foton. Sr dan Ti memiliki nomor atom tinggi sehingga mampu dengan baik untuk menyerap foton sehingga suatu material yang mengandung Sr dan Ti dapat dipertimbangkan untuk dibuat sebagai apron perisai radiasi. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 pada material CMC+AM, CMC, AM memerlukan tingkat ketebalan lebih tinggi jika dibandingkan dengan material lain yang diteliti. Agar kemudian dapat menjadi lebih efektif untuk dapat digunakan sebagai apron perisai radiasi, maka suatu material tidak hanya harus mengandung Sr dan Ti saja tetapi juga harus memiliki nilai rapat jenis yang tinggi. Dapat ditinjau dengan material CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub> maupun CMC+AM+Sr dengan nilai rapat jenis 1,95 g/cm<sup>3</sup> yang lebih tinggi mempunyai ketebalan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan material CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub> dan CMC+AM+Sr yang mempunyai nilai rapat jenis 1,2044 g/cm<sup>3</sup>. Penjelasan di atas secara visual ditampilkan pada Gambar 2, Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 2. Tebal maksimal material CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub> yakni: (a) 1,5 cm dengan rapat jenis 1,95 g/cm<sup>3</sup> dan (b) 2,5 cm dengan rapat jenis 1,2044 g/cm<sup>3</sup>.

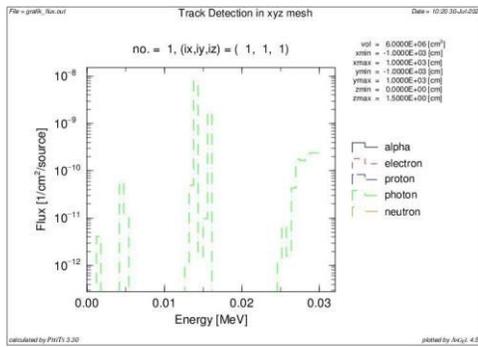


(a)

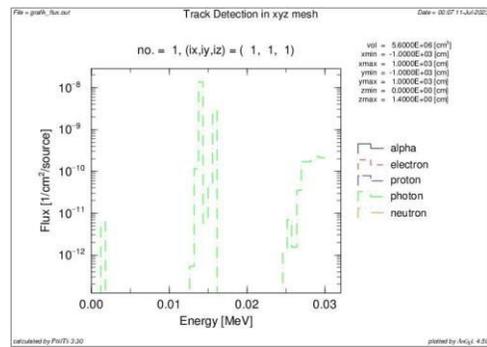


(b)

Gambar 3. Tebal maksimal material CMC+AM+Sr yakni: (a) 1,4 cm dengan rapat jenis 1,95 g/cm<sup>3</sup> dan (b) 2,3 cm dengan rapat jenis 1,2044 g/cm<sup>3</sup>.

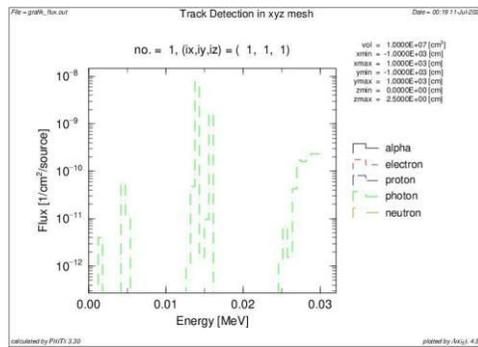


(a)

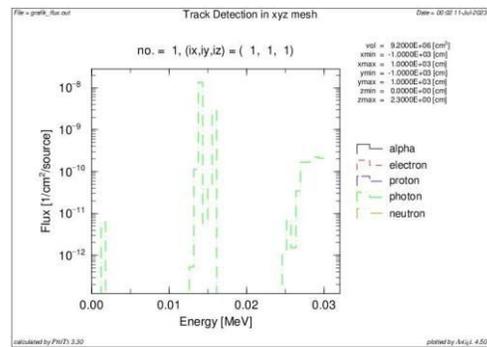


(b)

Gambar 4. Grafik fluks pada range energi foton sinar-X dari 0 keV sampai 30 keV pada material: (a) CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub> 1,95 g/cm<sup>3</sup> dan (b) CMC+AM+Sr 1,95 g/cm<sup>3</sup>.



(a)



(b)

Gambar 5. Grafik fluks pada range energi foton sinar-X dari 0 keV sampai 30keV pada material: (a) CMC+AM+SrTiO<sub>3</sub> 1,2044 g/cm<sup>3</sup> dan (b) CMC+AM+Sr 1,2044 g/cm<sup>3</sup>.

## SIMPULAN

1. Material bioplastik dengan pengisi SrTiO<sub>3</sub> dengan rapat jenis 1,95 g/cm<sup>3</sup> merupakan material yang lebih efektif daripada material bioplastik dengan pengisi SrTiO<sub>3</sub> dengan rapat jenis 1,2044 g/cm<sup>3</sup> untuk digunakan sebagai apron perisai radiasi.
2. Material bioplastik dengan pengisi SrTiO<sub>3</sub> memiliki daya tembus sejauh kurang dari 1,5 cm pada rapat jenis 1,95 g/cm<sup>3</sup> dan sejauh kurang dari 2,5 cm pada rapat jenis 1,2044 g/cm<sup>3</sup>.
3. Material target untuk dapat dijadikan apron perisai radiasi harus mempertimbangkan nomor atom dan rapat jenis material yang digunakan karena daya tembus suatu radiasi dipengaruhi oleh kedua keadaan tersebut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S.N. (2015) *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Second. Waltham, USA: Elsevier Inc.
- Alzahrani, J.S., Nazrin, S.N., Eke, C., Kebaili, I., Al-Buriahi, M.S. dan Joesry Syaiwan, A.S. (2022) "Effect of strontium oxide on radiation shielding features and elastic properties on zinc borotellurite glass system," *sRadiation Physics and Chemistry*, 199(March), hal. 110304. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110304>.
- Budiawan, M.A., Suryani, S., Abdullah, B. dan Tahir, D. (2019) "Analysis of Absorption Properties of a Composite FlyAsh and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for X-ray Radiation Shielding Applications," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 593. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/593/1/012014>.
- Gürel Özdemir, H., Kaçal, M.R., Akman, F., Polat, H. dan Agar, O. (2023) "Investigation of gamma radiation shielding characteristics of bismuth reinforced ternary composites in wide photon energy region," *Radiation Physics and Chemistry*, 208(March). Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110924>.
- Hannachi, E., Sayyed, M.I., Slimani, Y. dan Elsafi, M. (2023) "Structural, optical and radiation shielding peculiarities of strontium titanate ceramics mixed with tungsten nanowires: An experimental study," *Optical Materials*, 135(December 2022), hal. 113317. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.113317>.
- Martin, A., Harbison, S., Beach, K. dan Cole, P. (2012) *An Introduction to Radiation Protection*. sixth. Diedit oleh J. Wright. London, UK: Hodder Arnold.
- Morsi, M.A., Asnag, G.M., Rajeh, A. dan Awwad, N.S. (2021) "Nd:YAG

nanosecond laser induced growth of Au nanoparticles within CMC/PVA matrix: Multifunctional nanocomposites with tunable optical and electrical properties,” *Composites Communications*, 24(January), hal. 100662. Tersedia pada: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100662>.

Presiden Republik Indonesia (1997) *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran*. Indonesia.

Presiden Republik Indonesia (2007) *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselematan Radiasi Pengion dan Keamanan Sumber Radioaktif*. Indonesia.

Turner, J.E. (2007) *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Third. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.