

ANALISIS PEMANFAATAN PASIR BESI DAN BATU APUNG SEBAGAI AGREGAT BETON PERISAI RADIASI SINAR-X

Mar'atus Solihah¹⁾, Rahadi Wirawan¹⁾, Dian Wijaya Kurniawidi¹⁾, Nurul Qomariyah¹⁾,
Rinarito Subroto²⁾, I Wayan Ari Makmur³⁾

¹⁾Program Studi Fisika FMIPA, Universitas Mataram, Mataram, NTB, Indonesia

²⁾Instalasi Radioterapi RSUD Provinsi NTB, Mataram, NTB, Indonesia

³⁾Instalasi Radioterapi RSUD Provinsi NTB, Mataram, NTB, Indonesia

Corresponding author : Rahadi Wirawan
E-mail : rwirawan@unram.ac.id

Diterima 09 April 2023, Direvisi 13 Mei 2023, Disetujui 13 Mei 2023

ABSTRAK

Perisai radiasi dengan nilai koefisien atenuasi linier tinggi dan harga bahan yang ekonomis menjadi pertimbangan dalam pengembangan perisai radiasi. Bahan yang berpotensi untuk dikembangkan adalah pasir besi dan batu apung. Dalam penelitian ini dilakukan investigasi pengaruh variasi komposisi campuran agregat pasir besi-batu apung terhadap nilai densitas dan nilai koefisien atenuasi linier serta pengaruh ketebalan beton terhadap kemampuannya dalam menyerap radiasi sinar-x. Pengujian nilai koefisien atenuasi linier menggunakan berkas foton LINAC berenergi 6 MV dan 10 MV. Pencocokan kurva regresi linier (*linear fitting curve*) digunakan dalam penentuan nilai koefisien atenuasi linier. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar nilai densitas beton uji maka nilai koefisien atenuasi liniernya semakin meningkat. Nilai densitas beton tertinggi dimiliki oleh material beton C₅ yaitu 2,03 g/cm³. Material beton C₅ memiliki nilai koefisien atenuasi linier tertinggi yaitu 0,0524 cm⁻¹ dengan nilai HVL 13,23 cm dan 0,0419 cm⁻¹ dengan nilai HVL 16,54 cm untuk energi 6 MV dan 10 MV.

Kata kunci: beton; HVL; koefisien atenuasi linier; sinar-x.

ABSTRACT

Radiation shields with high linear attenuation coefficient values and economical material prices are considered in the development of radiation shields. Materials that have the potential to be developed are iron sand and pumice. In this research, we investigated the effect of variations in the composition of the iron sand-pumice aggregate mixture on the density value and the linear attenuation coefficient value as well as the effect of concrete thickness on its ability to absorb x-ray radiation. Testing the value of the linear attenuation coefficient using LINAC photon beams with energies of 6 MV and 10 MV. Linear fitting curve is used in determining the linear attenuation coefficient value. The results showed that the greater the density value of the test concrete, the higher the linear attenuation coefficient value. The highest concrete density value is owned by C₅ concrete material, which is 2.03 g/cm³. C₅ concrete material has the highest linear attenuation coefficient value of 0.0524 cm⁻¹ that other sample with an HVL value of 13.23 cm and 0.0419 cm⁻¹ with an HVL value of 16.54 cm respectively for 6 MV and 10 MV energies.

Keywords: concrete; HVL; linear attenuation coefficient; X-ray.

PENDAHULUAN

Kebermanfaatan radiasi dalam dunia medis sudah sangat berkembang, tidak hanya untuk keperluan radiologi diagnostik, namun juga untuk aplikasi radioterapi. Dalam pemanfaatan radiasi tersebut, penggunaan perisai radiasi sangat diperlukan untuk membatasi jumlah radiasi yang mengenai masyarakat umum ataupun petugas yang dapat mengakibatkan efek samping yang merugikan dari radiasi. Untuk

radiasi sinar- X atau sinar- γ , karakteristik perisai yang baik adalah perisai dengan koefisien atenuasi linier (μ) tinggi yang memiliki dampak iradiasi terhadap sifat mekanika perisai kecil (Aziz, 2018). Adapun nilai koefisien atenuasi linier perisai radiasi dipengaruhi jenis bahan, densitas dan energi radiasi sumber. Semakin besar nomor atom bahan perisai maka nilai μ akan semakin besar, sehingga bahan tersebut berpotensi untuk digunakan sebagai bahan

perisai radiasi (Fitter, 2018). Begitu pula dengan karakteristik densitasnya, nilai densitas yang tinggi menandakan bahwa partikel-partikel penyusunnya sangat rapat sehingga bagus untuk dijadikan sebagai perisai radiasi (Akhadi, 2000).

Bahan-bahan yang dapat digunakan sebagai perisai radiasi adalah timbal, beton, besi, tungsten, silika seperti semen dan batuan dengan performa perisai radiasi yang besar, dan polimer (Turhan *et al.*, 2023; Hannachi *et al.*, 2022; Almurayshid, *et al.*, 2021; Moharram *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2020; Azreen *et al.*, 2020). Timbal memiliki densitas yang paling tinggi di antara bahan lainnya dan memiliki nilai koefisien atenuasi paling besar. Selain jenis bahan, harga bahan dan deformasi plastis (*creep*) bahan juga menjadi pertimbangan di dalam pemilihan bahan perisai radiasi. Meskipun timbal efektif mengurangi paparan, namun timbal rentan terhadap *creep* (Aziz, 2018). Sementara beton lebih moderat. Oleh karena itu beton sering dipilih sebagai perisai radiasi (Abdullah *et al.* 2022; Gunoglu & Akkurt, 2021; Tyagi *et al.*, 2020; Aziz, 2018). Namun demikian beton juga memiliki kekurangan yang harus ditingkat kualitasnya. Variabilitas komposisi materialnya dan kandungan air didalam beton menyebabkan ketidakpastian distribusi radiasi yang berpengaruh pada parameter atenuasi radiasinya (Askarian *et al.*, 2019).

Beton normal diketahui memiliki densitas sekitar $2,3 - 2,500 \text{ g/cm}^3$, dimana untuk perisai radiasi beton dikembangkan menjadi beton densitas tinggi (*High Density Concrete*) dengan densitas yang lebih besar dari densitas beton normal ($> 3,0 \text{ g/cm}^3$) (Wijaya dkk., 2018; Attia *et al.*, 2022). Untuk mendapatkan beton dengan densitas tinggi, salah satu material agregat campuran beton yang berpotensi untuk digunakan adalah pasir besi dan batu apung. Pasir besi merupakan material alami dengan kandungan mineral magnetik *magnetit* (Fe_3O_4), *hematit* ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) dan memiliki densitas yang cukup tinggi yaitu $4,2 \text{ g/cm}^3 - 5,2 \text{ g/cm}^3$ (Dahlan *et al.*, 2018). Nilai densitas yang tinggi tersebut mengindikasikan bahwa partikel-partikel penyusun pasir besi sangat rapat sehingga baik digunakan sebagai penghalang antara radiasi dengan subjeknya (Aziz, 2018). Sementara itu, penambahan batu apung dalam campuran beton berperan sebagai bahan aditif dan jika dicampur dengan agregat lain membentuk beton bertekstur halus. Batu apung mengandung Fe_2O_3 yang berkontribusi cukup besar pada parameter radiasi (Wirawan *et al.*, 2021) dan penambahan bubuk batu apung hingga 50% pada beton

mampu meningkatkan daya tahan beton secara signifikan (Askarian *et al.*, 2019). Batu apung meningkatkan ketahanan beton terhadap suhu tinggi dan ketahanan sulfat serta meningkatkan kemampuan kerja campuran beton yang dapat memudahkan dalam pengaplikasiannya (Tanyildizi and Gokalp, 2023).

Pada penelitian ini dilakukan analisis pemanfaatan beton pasir besi dan batu apung sebagai beton perisai radiasi sinar-X ditinjau dari koefisien atenuasi linier dan *HVL* (*Half Value Layer*). Dari penelitian ini diharapkan dapat diperoleh komposisi pasir besi dan batu apung yang memiliki karakteristik sebagai perisai radiasi yang baik dengan nilai koefisien atenuasi linear yang besar.

METODE PENELITIAN

Pembuatan beton pada penelitian ini memerlukan beberapa peralatan antara lain ayakan, cetakan sampel berbahan akrilik, hand mortar, magnet permanen, dan neraca. Sementara itu, pengujian serapan radiasi menggunakan pesawat *Linear Accelerator* (Linac) Varian Clinac CX-SN6371, perangkat detektor *compact chamber CC13*, Elektrometer Dose1.

Bahan-bahan agregat beton yang digunakan antara lain air, batu apung, pasir besi, dan semen. Pasir besi berasal dari Pantai Ampenan, sementara batu apung diambil dari Desa Ijobalit Labuan Haji Kabupaten Lombok Timur. Proses peparasi pasir besi diawali dengan pasir besi yang sudah diambil dari pantai Ampenan dikeringkan dibawah sinar matahari, dan selanjutnya dipisahkan dari pengotornya menggunakan magnet. Pasir besi tersebut dihaluskan menggunakan mortar kemudian diayak untuk mendapatkan serbuk batu apung berukuran 0,2 mm. Sementara itu, preparasi batu apung dimulai dengan proses pembersihan batu apung kemudian dikeringkan dibawah sinar matahari. Batu apung kemudian dihaluskan menggunakan mortar dan selanjutnya diayak untuk mendapatkan serbuk batu apung berukuran 0,2 mm.

Sampel beton berbentuk persegi berdimensi 10 cm x 10 cm dengan ketebalan 1 cm, 2 cm, dan 3 cm. Komposisi campuran agregat pasir besi-batu apung yang dibuat dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Variasi Campuran Agregat Beton

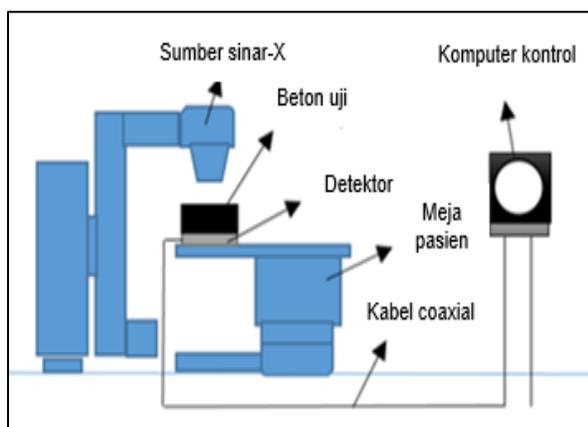
Nama Campuran	Pasir Besi (%)	Batu Apung (%)
C ₁	30	70
C ₂	40	60
C ₃	50	50
C ₄	60	40
C ₅	70	30

Selanjutnya dilakukan pengukuran nilai densitas (ρ) yang dimiliki setiap sampel beton yang telah dibuat menggunakan komposisi campurannya dengan persamaan (1),

$$\rho = \frac{\Sigma m}{V} \quad (1)$$

dimana ρ densitas beton (g/cm^3), Σm massa kering bahan (g) dan V volume bahan (cm^3).

Pengujian daya serap radiasi dilakukan pada jarak penempatan sampel dari sumber (SSD) 100 cm. Sampel beton diletakkan diatas meja pasien, dimana detektor CC13 diposisikan dibawah sampel pada kedalaman 1 cm (Gambar 1). Energi berkas foton yang digunakan 6 MV dan 10 MV menggunakan dosis 100 MU. Penyinaran awal tanpa adanya sampel beton dilakukan untuk memperoleh nilai intensitas awal sinar-X (I_0). Selanjutnya dilakukan pengujian atenuasi pada setiap sampel dengan perlakuan kedua variasi energi yang sama. Nilai yang tercantum pada display perangkat Elektrometer Dose1 merupakan intensitas radiasi (I).



Gambar 1. Skema Peralatan Dalam Pengujian Radiasi Menggunakan Linac

Setelah diperoleh nilai intensitas radiasi dari setiap sampel yang diuji, maka dilakukan

perhitungan nilai koefisien atenuasi linier (μ) sampel dengan menggunakan persamaan (2) berikut (Agar, 2019).

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

dimana I_0 adalah intensitas radiasi sebelum menembus bahan (watt/m^2), I adalah intensitas radiasi setelah menembus bahan (watt/m^2), μ adalah koefisien serap linier bahan (m^{-1}), x adalah tebal agregat beton yang diamati (2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm dan 6 cm).

Penentuan koefisien atenuasi masing masing sampel dilakukan menggunakan pendekatan regresi linier untuk setiap campuran. Selanjutnya nilai *HVL* (*Half Value Layer*) bisa dihitung menggunakan persamaan (3),

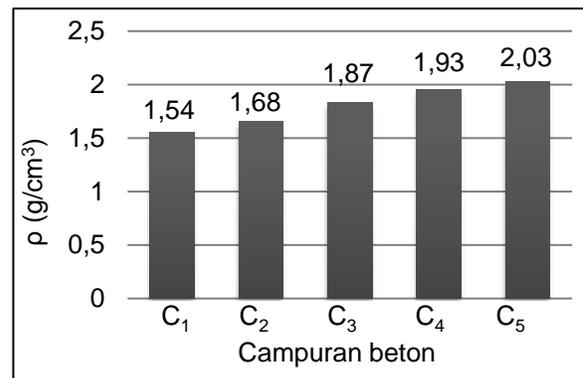
$$HVL = \frac{0,693}{\mu} \quad (3)$$

dimana μ adalah koefisien serap linier bahan (Agar, 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Hasil Pengukuran Densitas Beton

Gambar 2 memperlihatkan hasil pengukuran nilai densitas beton pasir besi dan batu apung yang telah dibuat.



Gambar 2. Nilai Densitas Beton Pasir Besi dan Batu Apung

Pada gambar 2 dapat dilihat bahwa material beton yang memiliki nilai densitas tertinggi adalah material C₅ dengan nilai 2,03 g/cm^3 . Gambar 2 juga memperlihatkan bahwa beton pasir besi dan batu apung memiliki nilai densitas yang semakin tinggi seiring bertambahnya jumlah pasir besi yang terdapat pada beton. Hal ini dikarenakan pasir besi memiliki densitas yang cukup tinggi yaitu sekitar

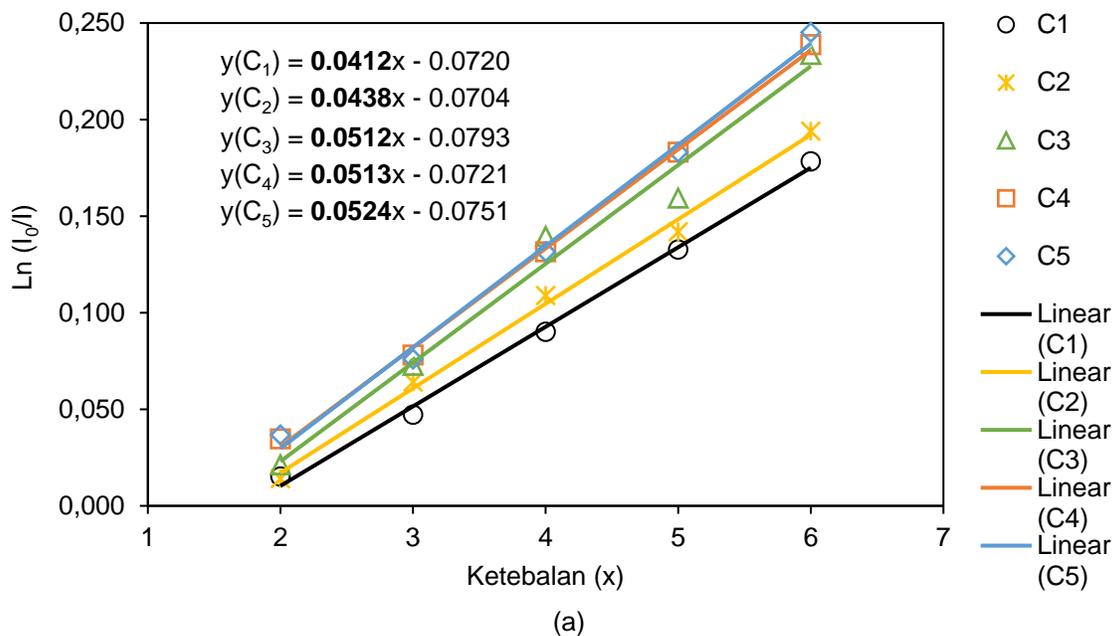
4,2 g/cm³. Nilai densitas yang dimiliki beton pasir besi dan batu apung lebih kecil jika dibandingkan dengan beton pada umumnya (2,50 g/cm³). Hal itu dikarenakan peningkatan jumlah batu apung di dalam beton.

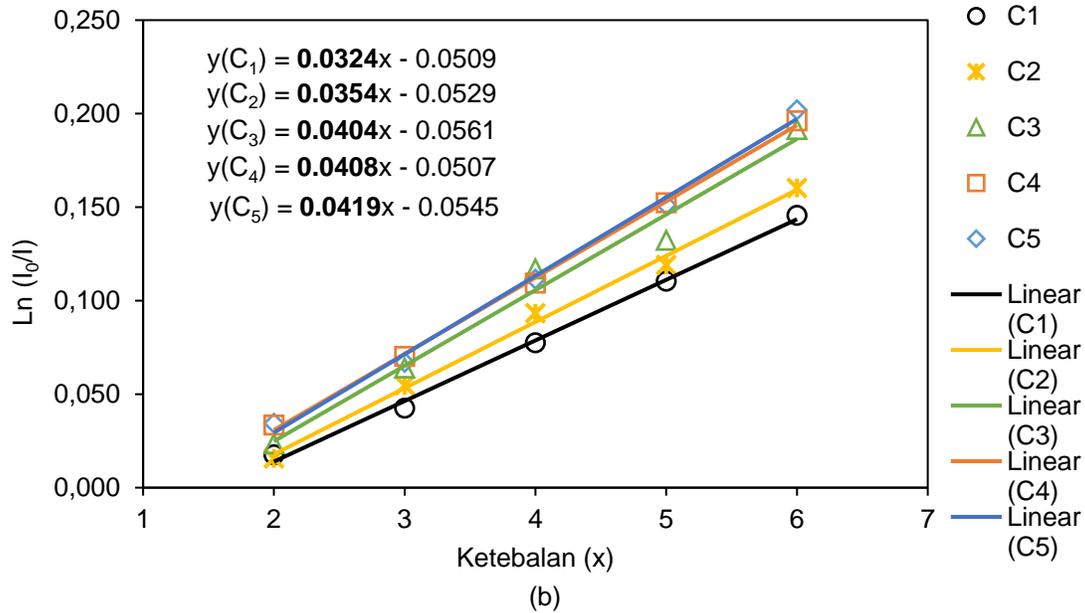
Batu apung yang digunakan pada penelitian ini adalah batu apung yang sudah berbentuk bubuk dengan ukuran 0,2 mm. Meskipun sudah berbentuk bubuk, keberadaan pori pada batu apung terdistribusi secara merata dengan ukuran yang berbeda-beda. Batu apung pulau Lombok termasuk dalam kategori mesopori (±4,4 nm) dan mikropori (±1,5 nm) (Kusumaningtyas, 2017). Ukuran diameter pori pada batu apung tersebut mempengaruhi nilai densitas keseluruhan beton. Diameter pori yang semakin besar menyebabkan densitas beton mengecil. Namun, perlu diingat bahwa tujuan penambahan batu apung dalam campuran beton perisai radiasi disini adalah untuk meningkatkan

daya tahan beton.

b. Hasil Pengujian Serapan Radasi Beton

Pengujian daya serap radiasi dilakukan pada jarak 100 cm dari sumber radiasi. Temperatur ruang yang terukur pada saat melakukan pengujian adalah 22,2°C dan tekanan udara adalah 1,005 Pa. Adapun variasi ketebalan sampel beton uji adalah 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, dan 6 cm. Ketebalan material beton yang tersedia adalah 1 cm, 2 cm, dan 3 cm. Untuk ketebalan 4 cm, 5 cm, dan 6 cm dilakukan penumpukan beton yang sudah tersedia dengan asumsi tidak ada faktor celah udara diantara tumpukan beton tersebut atau pengaruh keberadaan celah udara diabaikan. Hasil pengujian radiasi beton pasir besi dan batu apung ditampilkan pada gambar 3.





Gambar 3. Perbandingan antara intensitas radiasi awal dan radiasi yang ditembus dengan ketebalan material pada (a) Berkas energi 6 MV (b) Berkas energi 10 MV

Grafik pada gambar 3(a) menunjukkan bahwa semakin tebal sampel beton yang diuji maka semakin besar pula nilai rasio antara intensitas radiasi awal dan radiasi yang ditembus yang didapatkan. Hal itu menandakan bahwa radiasi yang diserap oleh perisai semakin banyak, dengan kata lain semakin tebal material beton maka semakin kecil radiasi yang menembus sampel beton.

Penentuan nilai koefisien atenuasi linier pada penelitian ini dilakukan dengan pendekatan pencocokan kurva regresi linier (*linear fitting curve*). Pada grafik 3(a) persamaan garis lurus untuk C₁ diberikan oleh $y = 0,0412x - 0,072$.

Persamaan tersebut menyatakan nilai koefisien atenuasi linier dari material uji yaitu $\mu = 0,0412 \text{ cm}^{-1}$. Sedangkan pada grafik 3(b) persamaan garis lurus untuk C₁ diberikan oleh $y = 0,0324x - 0,0509$. Persamaan tersebut menyatakan nilai koefisien atenuasi linier dari material uji yaitu $\mu = 0,0412$ untuk 6 MV cm^{-1} dan $\mu = 0,0324 \text{ cm}^{-1}$ untuk 10 MV. Dari nilai koefisien atenuasi linier yang diperoleh, kita dapat menentukan nilai *HVL* dari material beton berdasarkan persamaan (3). Nilai koefisien atenuasi linier dan nilai *HVL* dari masing-masing material beton ditampilkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien atenuasi linier (μ) dan *HVL* sampel

Nama campuran	6 MV		10 MV	
	$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	<i>HVL</i> (cm)	$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	<i>HVL</i> (cm)
C ₁	$0,0412 \pm 0,0014$	16,82	$0,0324 \pm 0,0011$	21,39
C ₂	$0,0438 \pm 0,0017$	15,83	$0,0354 \pm 0,0013$	19,58
C ₃	$0,0512 \pm 0,0042$	13,54	$0,0404 \pm 0,0034$	17,16
C ₄	$0,0513 \pm 0,0012$	13,51	$0,0408 \pm 0,0009$	16,99
C ₅	$0,0524 \pm 0,0022$	13,23	$0,0419 \pm 0,0017$	16,54

Pada Tabel 2 dapat diamati bahwa nilai koefisien atenuasi linier meningkat seiring dengan semakin meningkatnya jumlah pasir besi di dalam beton. Material beton dengan nilai koefisien atenuasi linier terbesar terdapat pada material C₅ yaitu 0,0524 cm⁻¹ untuk energi foton 6 MV dan 0,0419 cm⁻¹ untuk energi foton 10 MV. Begitu pula halnya dengan nilai HVL, nilai HVL terkecil terdapat pada material C₅ yaitu 13,23 cm untuk berkas energi 6 MV dan 16,54 cm untuk berkas energi 10 MV. Nilai koefisien atenuasi linier yang besar serta nilai HVL yang kecil dari material C₅ membuktikan bahwa material C₅ merupakan campuran agregat terbaik yang berpotensi untuk digunakan sebagai perisai radiasi jika dibandingkan dengan keempat campuran lainnya.

Selain itu, hasil pengujian serapan dosis radiasi yang dilakukan dengan perangkat detektor *compact chamber CC13* dan Elektrometer Dose1 untuk dua energi berkas foton pesawat Linac menunjukkan besarnya energi sumber mempengaruhi nilai koefisien atenuasi linier dimana semakin besar energi yang digunakan maka koefisien atenuasi linier sampel beton semakin kecil. Nilai HVL sampel beton besar jika digunakan radiasi dengan energi yang lebih besar. Hal tersebut dapat diamati untuk energi 10 MV dan energi foton 6 MV untuk ketebalan paruh radiasi.

Hasil koefisien atenuasi linier yang diperoleh dalam penelitian ini masih sedikit lebih rendah dibandingkan beton (2,3 g/cm³) 0,0523 cm⁻¹ untuk energi 10 MV (hasil analisa data NIST), sementara dengan beton peridotite (2.450 g/cm³) untuk 0,1167 cm⁻¹ berkas energi 6 MV dan 0.0915 cm⁻¹ untuk berkas energi 10 MV (Khaldari, 2016). Hal tersebut dikarenakan densitas beton yang dibuat (C5) memiliki densitas lebih rendah 2,03 g/cm³, namun nilai koefisien atenuasi sudah mendekati nilai untuk beton kuat tersebut. Oleh karenanya peningkatan densitas beton dapat dilakukan untuk meningkatkan besarnya nilai koefisien atenuasinya.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan paparan hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tinggi kandungan pasir besi yang terdapat pada beton maka semakin tinggi pula nilai densitas beton. Variasi komposisi campuran terbaik dengan nilai densitas tertinggi terdapat pada material C₅ yaitu sebesar 2,03 g/cm³. Nilai koefisien atenuasi linier meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah pasir besi dan di dalam beton. Koefisien atenuasi linier tertinggi terdapat pada material C₅ dengan nilai 0,0524± 0,0022 cm⁻¹ pada berkas energi foton 6 MV dan 0,0419± 0,0017 cm⁻¹ pada berkas energi foton

10 MV. Semakin tebal sampel beton yang diuji maka semakin besar pula radiasi yang diserap oleh perisai, dengan kata lain semakin kecil radiasi yang tembus dari beton.

UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada pihak instalasi radioterapi RSUD Provinsi NTB atas fasilitas, pengalaman serta bimbingan yang telah diberikan selama penelitian.

DAFTAR RUJUKAN

- Abdullah, M.A.H., Rashid, R. S. M., Amran, M., Hejazi, F., Azreen, N.M., Fediuk, R., Voo, Y.L., Vatin, N. I., and Idris, M. I. (2022). Recent Trends in Advanced Radiation Shielding Concrete for Construction of Facilities: Materials and Properties. *Polymers* 2022, 14, 2830. <https://doi.org/10.3390/polym14142830>.
- Agar O., Tekin H. O., Sayyed M. I., Korkmaz M. E., Culfa O., and Ertugay C. (2019). Experimental investigation of photon attenuation behaviors for concretes including natural perlite mineral, *Results in Physics* 12, 237-243.
- Akhadi, M. (2000). *Dasar-Dasar Proteksi Radiasi*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Almurayshid, M., Alsagabi, S., Alssalim, S., Alotaibi, Z., Almsalam, R. (2021). Feasibility of polymer-based composite materials as radiation shield. *Radiation Physics and Chemistry* Volume 183, 109425, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109425>.
- Askarian, M., Aval, S. F., Joshaghani, A. (2019). A Comprehensive Experimental Study on The Performance of Pumice Powder in Self-Compacting Concrete (SCC). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 7 (6), 340-356. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1511486>.
- Attia. M. M., Abdelsalam, B. A., Amin, M., Agwa, I. S., Abdelmagied, M. F. (2022). Metal-Nails Waste and Steel Slag Aggregate as Alternative and Eco-Friendly Radiation Shielding Composites. *Buildings* 2022, 12, 1120, 1-14.
- Aziz, F. (2018). Penelitian dan Pengembangan Material Struktur Reaktor Maju. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol. 20. No.1, 41-51.
- Azreen N.M., Rashid R.S.M., Haniza M., Voo Y.L., Amran Y.H.M. (2018). Radiation shielding of ultra-high-performance concrete with silica sand, amang and lead glass. *Construction and Building*

- Materials, 172, 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.243>.
- Dahlan, K., Haryati, E., and Aninam, Y. S. (2018). The use of Papuan iron sand and river sand for fine aggregate in mortar for nuclear radiation shield application. *Journal of Physics. Conf. series* 997 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/997/1/012023>.
- Fitler. (2018). Tesis: Pembuatan Dan Karakterisasi Perisai Radiasi Sinar-X Berbasis Polyester Timbal Asetat Sebagai Salah Satu Alternatif Pengganti Kaca Timbal. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Gunoglu, K., Akkurt, I. (2021). Radiation shielding properties of concrete containing magnetite. *Progress in Nuclear Energy, Volume 137, 2021, Article 103776*. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103776>.
- Hannachi, E.; Mahmoud, K.A.; Almuqrin, A.H.; Sayyed, M.I.; Slimani, Y. (2022). Evaluation of the Radiation-Protective Properties of Bi (Pb)–Sr–Ca–Cu–O Ceramic Prepared at Different Temperatures with Silver Inclusion. *Materials* 2022, 15, 1034. <https://doi.org/10.3390/ma15031034>
- Khaldari, R., Asghar Mesbahi, A., Kara, U. (2016). Monte Carlo Calculation of Shielding Properties of Newly Developed Heavy Concretes for Megavoltage Photon Beam Spectra Used In Radiation Therapy, *Iranian Journal of Medical Physics* Vol. 13, No. 4, 250-260.
- Kusumaningtyas, M. P. (2017). Skripsi: Analisis Struktur Nano Batu Apung Lombok Menggunakan Metode BET (Brunauer-Emmett-Teller). Surabaya: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Moharram B.M., Nagy M.E., Shaat M.K., Sayed A.R.E., Fayiz M., Dwidar S.A., Dorrah M.E., (2020). Performance of lead and iron oxides nanoparticle materials on shielding properties for γ -rays. *Radiation Physics and Chemistry*. Vol. 173:108880. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108880>.
- Tanyildizi, M., Gokalp, I. (2023). Utilization of pumice as aggregate in the concrete: A state of art. *Construction and Building Materials, Vol. 377, 131102*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131102>.
- Turhan, M.F., Akman, F., Kacal, M.R., Polat, H., Demirkol, I. (2023). A study for gamma-ray attenuation performances of barite filled polymer composites. *Applied Radiation and Isotopes, Volume 191, 110568*, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110568>.
- Tyagi, G., Singhal, A., Routroy, S., Bhunia, D., and Lahoti, M. (2021). Radiation Shielding Concrete with alternate constituents: An approach to address multiple hazards, *Journal of Hazardous Materials, Volume 404, Part B, 124201* <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124201>.
- Wijaya, J., Sikomena, E. F., Budi, G. S., Koentjoro, H. (2018). High Density Concrete dengan Menggunakan Barit sebagai Penahan Radiasi. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil, Vol. 7 No.1, 195-202*.
- Wirawan, R., Qomariyah, N., Ardianto, T., and Kurniawidi, D. W. (2021). Analysis of the radiation parameters of pumice constituent compounds using XCOM. *Journal of Physics: Conference Series* 1816 (2021) 012116 IOP Publishing <https://doi:10.1088/1742-6596/1816/1/012116>.
- Wu, Y., Cao Y., Wu Y., and Li D. (2020). Mechanical Properties and Gamma-Ray Shielding Performance of 3D-Printed Poly-Ether-Ether-Ketone/Tungsten Composites, *Materials* 2020, 13, 4475, 1-22. <https://doi:10.3390/ma13204475>.