

Analisis Parameter Keluaran pada Kolom Termal Reaktor Kartini untuk *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) dengan *Software Phits*

Sitti Yani¹ ✉, Siti Hadijah¹, dan Abd. Djamil Husin¹

¹Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Jalan Meranti, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680

Info Artikel

Sejarah Artikel:
Diterima:
13 November 2022
Disetujui:
28 Desember 2022
Dipublikasikan:
29 Desember 2022

Keywords:
BNCT, Thermal column, Kartini reactor, Monte Carlo, PHITS

ABSTRAK

Desain kolom termal sebuah reaktor yang akan digunakan dalam terapi BNCT perlu dilakukan untuk menjamin bahwa parameter berkas keluaran reaktor sesuai dengan ketentuan IAEA seperti parameter distribusi fluks neutron dan laju dosis sinar gamma. Penelitian ini dilakukan modifikasi desain kolom termal reaktor Kartini secara komputasi menggunakan metode *Monte Carlo* dengan *software Particle and Heavy Ion Transport Code System* (PHITS). Material kolom termal yang digunakan dalam simulasi ini yaitu 16 cm Al, 12 cm Pb, 15 cm Ni, dan 87 cm grafit pada modifikasi 1 dan 87.0 cm, 74.5 cm, dan 61.5 cm pada modifikasi 2. Energi neutron yang digunakan yaitu sebesar 2 MeV, 2.5 MeV, dan 3 MeV. Hasil simulasi dari modifikasi desain tersebut dilakukan analisis parameter fluks neutron epitemal, neutron cepat, dosis gamma, rasio antara fluks termal dan epitemal, serta rasio antara arus neutron dan fluks neutron total. Modifikasi 2 dengan energi 2 MeV dan 2.5 MeV menunjukkan modifikasi terbaik untuk simulasi kolom termal yang sesuai dengan ketentuan IAEA yaitu menghasilkan fluks neutron epitemal sebesar 1.78×10^9 n/cm²s dan 1.46×10^9 n/cm²s serta dosis gamma sebesar 1.72×10^{-13} Gy cm²/n dan 1.91×10^{-13} Gy cm²/n.

ABSTRACT

The design of the thermal column of a reactor to be used in BNCT therapy needs to be done to ensure that the output beam parameters of the reactor comply with IAEA regulations such as distribution of the neutron flux and the dose rate of the gamma rays. In this study, a modification of the Kartini reactor thermal column design was carried out computationally using the Monte Carlo method with Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) software. The column thermal materials used in this simulation are 16 cm Al, 12 cm Pb, 15 cm Ni, and 87 cm graphite in modification 1 and 87 cm, 74.5 cm, and 61.5 cm in modification 2. The neutron energy used is 2 MeV, 2.5 MeV, and 3 MeV. The simulation results from the modification design were analyzed for the parameters of the epithelial neutron flux, fast neutrons, gamma dose, the ratio between thermal and epithelial fluxes, and the ratio between the neutron current and the total neutron flux. Modification 2 with an energy of 2 MeV and 2.5 MeV shows the best modification for the thermal column simulation in accordance with the IAEA provisions, which produces an epithelial neutron flux of 1.78×10^9 n/cm²s and 1.46×10^9 n/cm²s and a gamma dose of 1.72×10^{-13} Gy cm²/n and 1.91×10^{-13} Gy cm²/n.

✉ Alamat korespondensi:
Jalan Meranti, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680
E-mail: sittiyani@apps.ipb.ac.id

PENDAHULUAN

Kanker adalah penyakit yang disebabkan oleh pertumbuhan sel abnormal pada jaringan tubuh. Pada dasarnya, kanker dapat berkembang di bagian tubuh mana saja termasuk otak, payudara, hati, dan paru-paru. Kanker otak adalah penyakit dimana pertumbuhan sel abnormal terjadi di otak. Kanker otak merupakan kanker dengan tingkatan keganasan kedua setelah kanker darah (*leukemia*) (Pertiwi & Purnami, 2020). Otak mengontrol semua fungsi tubuh, mulai dari fungsi gerak dan metabolisme hingga pikiran dan perasaan. Fungsi tubuh dapat terganggu jika sel-sel abnormal tumbuh di otak.

Penyembuhan kanker dapat menggunakan beberapa metode seperti pembedahan, radioterapi (Baskar, Lee, & Yeoh, 2012), dan kemoterapi. Penyembuhan tersebut masih ada kekurangannya, seperti pembedahan sulit mengobati pada kanker stadium awal atau metastasis dan hanya bisa mengobati pada kanker yang telah berkembang, metode radioterapi mampu membunuh kanker namun dapat merusak sel sehat di sekitarnya (Stone, Coleman, Anscher, & McBride, 2003) (Kim, Jenrow, & Brown, 2014) dan kemoterapi dapat menyebabkan diare, rasa lelah dan lemah sepanjang hari serta kerontokan pada rambut. Karena hal tersebut maka dikembangkan metode yang memiliki dampak lebih kecil yaitu *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) (Jalut, Rupiasih, & Sardjono, 2020). BNCT adalah metode yang sedang dikembangkan untuk penyembuhan kanker otak (Pramusinta, Zailani, & Sardjono, 2019). Keberhasilan pengobatan dengan metode ini bergantung pada kemampuan untuk mengkonsentrasikan Boron-10 dalam jumlah yang cukup pada sel kanker target dan kemampuan untuk mengirimkan neutron termal ke sel kanker. Teknik BNCT memanfaatkan nuklida non-radioaktif Boron-10 untuk menangkap neutron termal melalui reaksi $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Partikel alfa dan ^7Li yang dihasilkan dari reaksi tersebut memiliki Transfer Energi Linier (LET) yang tinggi yang dapat membunuh sel kanker (Wahyuni & Sarjono, 2018) (Malouff dkk., 2021).

Indonesia memiliki tiga reaktor riset nuklir yang dioperasikan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional Indonesia (BATAN), yaitu reaktor TRIGA 2000 di Bandung, TRIGA MARK-II (Reaktor Kartini) di Yogyakarta, dan GA Siwabessy Serbaguna Reaktor di Serpong (Priambodo, Nugroho, Palupi, Zailani, & Sardjono, 2017). Reaktor Kartini memiliki daya termal sebesar 100 kW yang dilengkapi berbagai fasilitas untuk penelitian BNCT. Salah satu fasilitas pendukung reaktor Kartini adalah kolom termal untuk menghasilkan fluks neutron yang sesuai standar IAEA (*International Atomic Energy Agency*) untuk BNCT yaitu $1,0 \times 10^9$ n/cm²s (Agosteo dkk., 2001). Flux neutron yang dihasilkan oleh teras reaktor Kartini cukup tinggi yang melebihi ketentuan IAEA sehingga diperlukan modifikasi kolom termal untuk menurunkan fluks neutron tersebut. Modifikasi kolom termal reaktor Kartini sebelumnya telah dilakukan oleh (Fauziah, Widiharto, & Sardjono, 2013). Pada penelitian ini, fluks neutron epitermal dari desain kolom termal ini masih belum memenuhi standar ketentuan IAEA.

Modifikasi kolom termal reaktor Kartini dapat dimodelkan dengan perangkat lunak berbasis Monte Carlo seperti *Particle and Heavy Ion Transport Code System* (PHITS). PHITS merupakan software yang dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Agency (JAEA) yang digunakan untuk mensimulasikan hampir semua jenis partikel diantaranya neutron, proton, ion berat, foton, dan elektron (Sato, et al., 2015). Penggunaan simulasi ini dapat menghemat perkiraan biaya pemasangan komponen reaktor dan dapat menghindari risiko paparan radiasi yang tinggi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis distribusi fluks neutron dan menghitung komponen laju dosis sinar gamma pada kolom termal yang telah dimodifikasi dari penelitian sebelumnya (Fauziah, Widiharto, & Sardjono, 2013) dengan menggunakan PHITS agar parameter yang dihasilkan sesuai dengan ketentuan IAEA.

METODE

Pembuatan Parameter

Dalam penelitian ini, kolom termal dirancang dan dimodifikasi untuk menghasilkan fluks neutron epitermal yang sesuai ketentuan IAEA untuk BNCT. Perancangan kolom termal meliputi bagian-bagian penting seperti filter neutron termal, moderator neutron, perisai gamma dan blok grafit. Tabel 1 berikut menampilkan parameter yang dimodifikasi dalam penelitian ini yang terdiri dari jenis dan tebal material yang mengacu pada penelitian Fauziah (Fauziah, Widiharto, & Sardjono, 2013).

Tabel 1 Parameter simulasi

Kolom Termal	Jenis Material	Ketebalan (cm)
Moderator neutron	Al ($\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$)	16
Filter neutron	Ni ($\rho = 8.64 \text{ g/cm}^3$)	15
Perisai gamma	Pb ($\rho = 11.34 \text{ g/cm}^3$)	12
Modifikasi 1 :		
Blok grafit	C ($\rho = 2.27 \text{ g/cm}^3$)	87
Modifikasi 2 :		
Blok grafit 1	C ($\rho = 2.27 \text{ g/cm}^3$)	87
Blok grafit 2	C ($\rho = 2.27 \text{ g/cm}^3$)	74,5
Blok grafit 3	C ($\rho = 2.27 \text{ g/cm}^3$)	61,5

Sumber

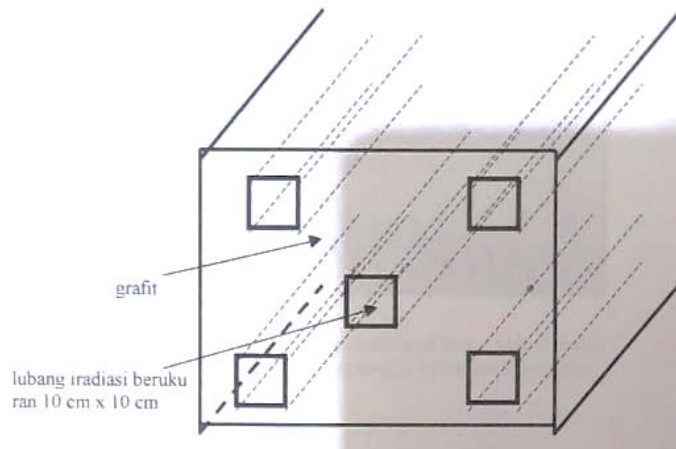
Source pada PHITS merupakan bagian input yang mendefinisikan sumber energi yang digunakan. Sumber energi berasal dari partikel neutron pada rentang neutron cepat berupa sumber titik dengan variasi energi 2 MeV, 2.5 MeV, dan 3 MeV.

Pembuatan material

Pembentukan material dalam 3 dimensi maupun 2 dimensi didefinisikan pada [Material] section. Dalam penelitian ini menggunakan 4 bahan yaitu Al sebagai moderator, karbon, nikel sebagai filter, dan timbal sebagai perisai gamma. Moderator Aluminium diubah dari penelitian sebelumnya yaitu Karbon, karena material yang dipilih memiliki tampang lintang mikroskopik lebih besar pada rentang energi neutron cepat dibandingkan pada rentang energi neutron epitermal (Vallenry, Widiharto, & Sardjono, 2012). Penambahan Nikel sebagai filter karena memiliki penampang minimum pada kisaran neutron epitermal, massa atomnya yang tidak terlalu kecil akan membuat terlalu banyak pengurangan energi neutron, namun tidak terlalu tinggi yang hanya akan sedikit menggeser spektrum energi neutron (Fauziah, Widiharto, & Sardjono, 2013). Untuk menekan dosis gamma, ditambahkan material Pb di ujung kolom termal. Timbal memiliki nomor atom dan densitas yang tinggi, yakni dengan nomor atom 82 dan densitas 11.35 gram/cm^3 . Bagian [Material] ditentukan oleh jumlah material, elemen, dan rasio komposisinya.

Pengaturan geometri dan desain fasilitas BNCT dipertimbangkan untuk mengoptimalkan fluks neutron epitermal agar berhasil digunakan sebagai balok dalam studi BNCT. Ada beberapa studi kasus yang sedang diamati di seluruh dunia untuk menemukan kelayakan dalam memodifikasi neutron

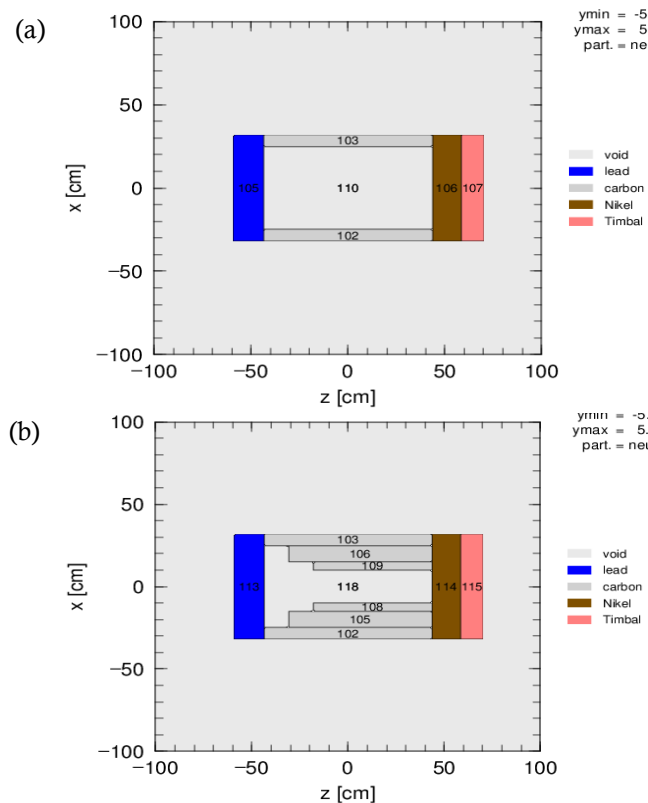
epitermal di reaktor penelitian untuk BNCT (Shalbi, Sazali, & Salleh, 2020). Gambar 1(a) menunjukkan kolom termal Reaktor Kartini sebelum modifikasi.



Gambar 1. Kolom termal sebelum modifikasi tampak dari depan

Desain Modifikasi Kolom Termal

Geometri kolom termal modifikasi 1 dan 2 ini menggunakan balok (rpp) dengan dimensi x_{min} x_{max} y_{min} y_{max} z_{min} z_{max} di bagian [surface] section dengan menghilangkan grafit bagian tengah di kolom termal. Geometri 2 dimensi untuk modifikasi ini ditampilkan pada Gambar 2 berikut dengan menggunakan perangkat lunak PHITS.



Gambar 2. Desain kolom termal setelah (a) modifikasi 1 dan (b) modifikasi 2 tampak dalam (2D)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Normalisasi

Normalisasi digunakan untuk memperoleh output PHITS yang setara dengan reaktor Kartini yang sesungguhnya. Faktor normalisasi didapatkan dengan mengubah daya menjadi laju fisi berdasarkan daya optimum reaktor Kartini sebesar 100 kW. Laju fisi dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$(10^5 W) \left(\frac{1J/detik}{W} \right) \left(\frac{1 MeV}{1,60 \times 10^{-13} J} \right) \left(\frac{1 fisi}{200 MeV} \right) = 3,12 \times 10^{15} fisi/detik \quad (1)$$

Artinya bahwa daya sebesar 100 kW memerlukan $3,12 \times 10^{15}$ fisi/detik. Data ini digunakan untuk menghitung faktor multiplikasi (f_m) pada Persamaan (2) dalam perhitungan fluks neutron dan dosis gamma.

$$f m_n = \left(\frac{3,121 \times 10^{15} fisi}{detik} \right) \left(\frac{2,42 n}{fisi} \right) = 7,55 \times 10^{15} n/detik \quad (2)$$

Nilai ini akan dipakai pada perhitungan fluks neutron dan perhitungan laju dosis neutron, sedangkan faktor multiplikasi untuk foton gamma menggunakan Persamaan (3).

$$f m_\gamma = \left(\frac{3,121 \times 10^{15} fisi}{detik} \right) \left(\frac{1 \gamma}{fisi} \right) = 3,12 \times 10^{15} \gamma/detik \quad (3)$$

Nilai ini akan digunakan pada perhitungan laju dosis gamma. Nilai-nilai tersebut digunakan sebagai parameter dalam merancang kolom termal agar keluaran radiasi dari reaktor memenuhi standar IAEA. Pada perhitungan arus neutron perlu dibagi dengan luas termal keluaran neutron pada kolom termal. Dalam penelitian ini telah ditetapkan bahwa ujung keluaran berupa material timbal dengan panjang 16 cm, lebar 74 cm, dan tinggi 64 cm, sehingga faktor multiplikasi arus neutron seperti ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$\frac{7,553 \times 10^{15} n/s}{2 \times (pl + pt + lt)} = 5,43 \times 10^{11} n/cm^2 s \quad (4)$$

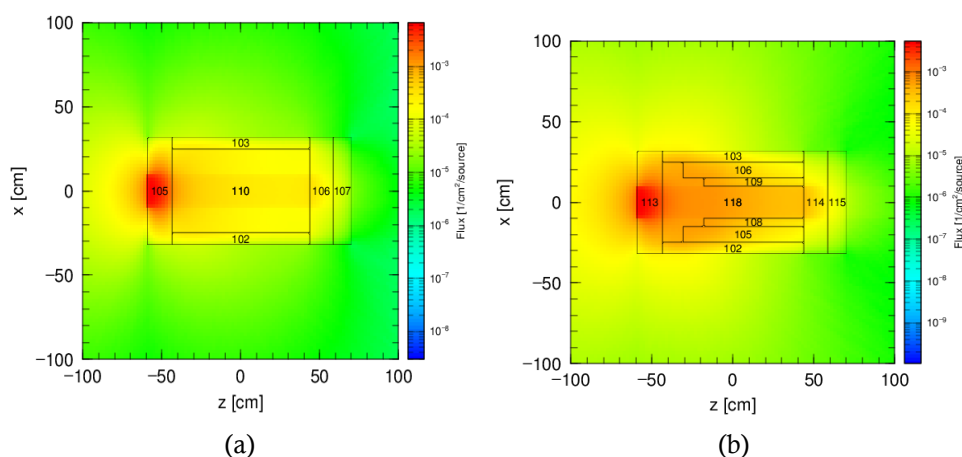
Penelitian BNCT di Indonesia dilakukan di reaktor Kartini, Yogyakarta, yang merupakan reaktor riset dengan daya 100 kW. Dalam pemodelan ini daya reaktor dianggap konstan, sementara pada kondisi asli, besar daya terjadi fluktuasi. Karena yang disimulasikan hanya satu partikel maka untuk mendapatkan hasil keluaran PHITS yang ekuivalen dengan reaktor kartini yang sesungguhnya, hasil tally harus dikalikan faktor multiplikasi. Tally dan faktor multiplikasi memberikan hasil dalam $n/cm^2 s$ untuk fluks neutron yang sesuai dengan ketentuan IAEA.

Distribusi Fluks Neutron

Distribusi fluks neutron total

Berdasarkan Gambar 3(a) modifikasi 1 terdapat material 105 yaitu aluminum sebagai moderator, material 103 dan 102 yaitu grafit, material 106 yaitu nikel sebagai filter dan material 107 yaitu timbal sebagai perisai gamma. Sedangkan pada Gambar 3(b) modifikasi 2 terdapat material 113 yaitu aluminum sebagai moderator, material 103, 102, 105, 106, 108, dan 109 yaitu grafit, material 114 yaitu nikel sebagai filter dan material 115 yaitu timbal sebagai perisai gamma.

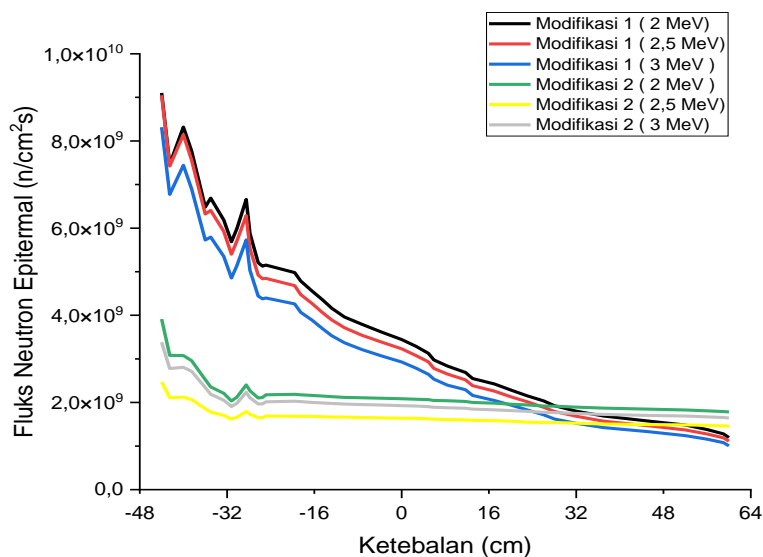
Berdasarkan Gambar 3, aluminium melakukan efek moderasi yang sangat baik sehingga mengurangi dosis neutron cepat lebih cepat. Filter berfungsi untuk menahan neutron cepat dan neutron termal, serta meloloskan neutron epitermal yang keluar dari reaktor. Material nikel yang memiliki kemampuan untuk mempertahankan neutron yang paling baik. Nilai fluks tertinggi yang diperoleh sebesar 10^{-3} fluks ($\text{cm}^2/\text{source}$) yang ditandai dengan warna merah, dimana bagian tersebut merupakan sumber partikel titik neutron, sedangkan bagian yang memiliki nilai fluks terendah yaitu pada bagian warna hijau dengan nilai fluks 10^{-6} fluks ($\text{cm}^2/\text{source}$).



Gambar 3. Distribusi track fluks neutron dengan energi neutron awal 2.5 MeV (a) modifikasi 1 dan (b) modifikasi 2

Fluks Neutron Epitermal

Jika digunakan untuk reaktor nuklir, grafit terutama sebagai material moderator dan reflektor dapat memberikan sifat-sifat yang baik. Tingkat perbandingan tampang lintang penyerapan dan penyebaran yang tinggi menjadikannya material refleksi yang baik, sehingga dapat menurunkan nilai fluks neutron epitermal.



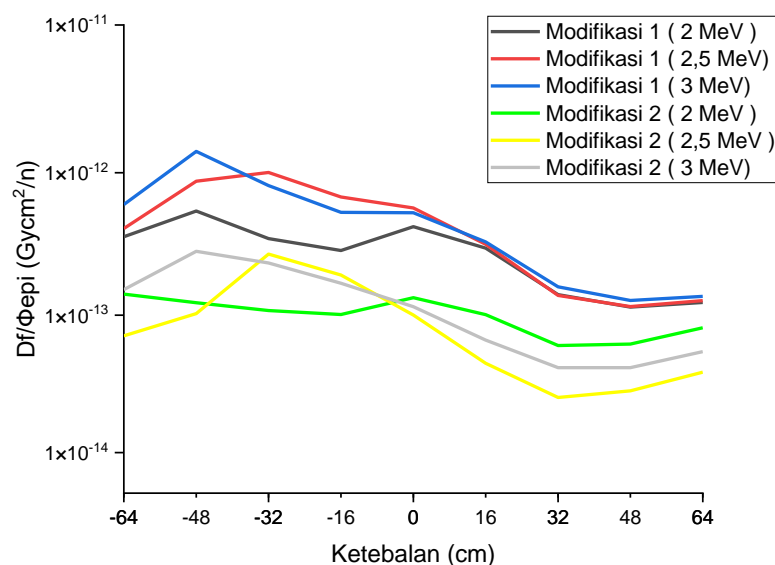
Gambar 4. Distribusi fluks neutron epitermal terhadap ketebalan

Gambar 4 menunjukkan fluks neutron epitermal pada modifikasi 1 menurun secara eksponensial seiring peningkatan ketebalan material sedangkan pada modifikasi 2 cenderung lebih stabil. Hal ini karena setelah dimoderasi oleh Aluminium maka neutron akan berinteraksi dengan grafit. Pada modifikasi 2 grafit memiliki 3 ketebalan yang menyebabkan nilai fluks neutron epitermal menurun drastis, karena termoderasi menjadi neutron termal dan menambah fluks neutron termal. Moderasi adalah penurunan tingkat energi neutron. Berdasarkan hasil simulasi pada modifikasi 1 fluks neutron epitermal pada energi 2 MeV, 2.5 MeV, dan 3 MeV masing-masing sebesar 1.19×10^9 n/cm²s, 1.11×10^9 n/cm²s, dan 1.00×10^9 n/cm²s. Sedangkan pada modifikasi 2 fluks neutron epitermal keluaran yang dihasilkan 2 MeV, 2.5 MeV, dan 3 MeV masing-masing sebesar 1.78×10^9 n/cm²s, 1.46×10^9 n/cm²s, dan 1.64×10^9 n/cm²s. Hasil ini memenuhi kriteria IAEA $> 1.0 \times 10^9$ n/cm²s.

Penelitian yang telah ada menunjukkan bahwa fluks berkas neutron epitermal minimum yang sesuai adalah 10^9 n/cm²s. Bisa juga menggunakan berkas dengan intensitas 5.00×10^8 n/cm²s, namun perlu waktu iradiasi yang lebih lama. Jika menggunakan intensitas yang lebih tinggi (10^{10}), waktu penyinaran yang lebih singkat harus diimbangi dengan peningkatan kualitas berkas sinar (Nurlaili, Azam, Firdausi, & Widarto, 2008).

Komponen Neutron Cepat

Moderator neutron berfungsi untuk menurunkan fluks neutron epitermal sehingga parameter ujinya adalah komponen neutron cepat (\dot{D}_f/Φ_{epi}). Komponen neutron cepat keluaran kolom termal dianalisa untuk dipilih nilainya yang cukup kecil.



Gambar 5. \dot{D}_f/Φ_{epi} terhadap ketebalan kolom termal

Gambar 5 menunjukkan bahwa kedua modifikasi dengan variasi 2 MeV, 2.5 MeV, dan 3 MeV mempunyai pola yang sama. Komponen neutron cepat meningkat pada ketebalan -64 cm hingga -48 cm, menurun setelah kedalaman -48 cm dan naik kembali pada ketebalan 32 cm. Hal ini karena pada awalnya dosis neutron cepat masih lebih besar dibandingkan fluks neutron epitermal sehingga menyebabkan parameter ini meningkat. Pada penambahan ketebalan selanjutnya, spektrum energi neutron telah berada pada daerah epitermal dan terus termoderasi menuju daerah termal. Artinya

fluks neutron epitermal akan semakin berkurang dan penyebut dari parameter tersebut juga akan semakin kecil. Hal ini menyebabkan \dot{D}_f/Φ_{epi} selanjutnya mengalami peningkatan.

Perbandingan antar variasi di modifikasi 1 dan 2 bahwa variasi 3 MeV menghasilkan parameter tertinggi dan variasi 2 MeV terendah. Pada modifikasi 1 nilai \dot{D}_f/Φ_{epi} dengan variasi 2 MeV, 2,5 MeV, dan 3 MeV lebih tinggi dibanding modifikasi 2 dengan variasi yang sama. Hal ini karena penambahan ketebalan beberapa grafit pada modifikasi 2 menyebabkan menurunnya neutron cepat lebih besar sehingga neutron cepat lebih rendah di banding neutron epitermal dan hasilnya \dot{D}_f/Φ_{epi} lebih rendah di banding modifikasi 1. Modifikasi 1 dengan variasi 2 MeV, 2,5 MeV, dan 3 MeV memperoleh nilai \dot{D}_f/Φ_{epi} masing-masing sebesar 1.23×10^{-13} Gy cm²/n, 1.27×10^{-13} Gy cm²/n dan 1.36×10^{-13} Gy cm²/n. Sedangkan modifikasi 2 dengan variasi 2 MeV, 2,5 MeV, dan 3 MeV memperoleh nilai \dot{D}_f/Φ_{epi} masing-masing sebesar 0.38×10^{-13} Gy cm²/n, 0.54×10^{-13} Gy cm²/n, dan 0.81×10^{-13} Gy cm²/n. Hasil kedua modifikasi tersebut memenuhi ketentuan IAEA $< 2.00 \times 10^{-13}$ Gy cm²/n. Modifikasi yang paling baik adalah modifikasi 2 dengan energi 2 MeV karena mampu menurunkan \dot{D}_f/Φ_{epi} hingga pada titik terendahnya.

Komponen Laju Dosis Sinar Gamma

Sinar gamma tidak hanya menyinari volume target kanker yang telah diinjeksikan senyawa pembawa boron-10, melainkan sebagian besar jaringan sehat di sekitarnya, maka komponen ini harus dihilangkan. Pada volume target, nilai komponen laju sinar gamma yang diijinkan adalah kurang dari 2×10^{-13} Gy cm²/n per neutron epitermal. Perisai gamma berfungsi untuk mengurangi intensitas radiasi gamma tanpa mengurangi fluks neutron epitermal secara signifikan, sehingga perlu dilakukan optimasi penambahan perisai gamma agar diperoleh $\dot{D}_\gamma/\Phi_{epi}$ yang sekecil-kecilnya dan fluks neutron epitermal yang tinggi (Muslih, Sardjono, & Widiharto, 2014). Material yang dipilih mempunyai densitas tinggi seperti Pb. Material Pb mempunyai koefisien attenuasi yang besar dan lebih mudah untuk diperoleh.

Komponen laju dosis gamma pada modifikasi 1 menurun seiring dengan peningkatan ketebalan material, namun pada ketebalan 32 cm hingga 48 cm komponen laju dosis gamma meningkat. Hal ini disebabkan karena pada ketebalan tersebut terdapat material nikel yang hanya bisa menahan neutron cepat dan neutron termal namun meloloskan neutron epitermal, sehingga nikel tidak mampu untuk menurunkan laju gamma. Pada modifikasi 2 nikel sebagai filter tidak signifikan mempengaruhi laju dosis gamma. Hal ini karena ketebalan beberapa grafit di bagian dalam kolom termal modifikasi 2 yang dapat menyerap sinar gamma lebih besar.

Berdasarkan Tabel 2 komponen laju dosis gamma ($\dot{D}_\gamma/\Phi_{epi}$) yang tepat keluar dari simulasi modifikasi 1 dengan energi 2 MeV, 2,5 MeV dan 3 MeV yaitu masing-masing sebesar 2.35×10^{-13} Gy cm²/n, 4.62×10^{-13} Gy cm²/n, dan 5.65×10^{-13} Gy cm²/n. Hasil tersebut masih berada di atas standar yang telah ditetapkan IAEA yakni $< 2.00 \times 10^{-13}$ Gy cm²/n. Sedangkan pada modifikasi 2 dengan energi 2 MeV, 2,5 MeV dan 3 MeV yaitu masing-masing sebesar 1.72×10^{-13} Gy cm²/n, 1.91×10^{-13} Gy cm²/n, dan 2.85×10^{-13} Gy cm²/n. Hasil tersebut pada energi 2 MeV dan 2,5 MeV memenuhi standar yang telah ditetapkan IAEA $< 2.00 \times 10^{-13}$ Gy cm²/n, namun energi 3 MeV masih berada di atas standar IAEA.

Parameter berkas keluaran akhir neutron berdasarkan optimasi modifikasi 1 dan 2 dengan variasi energi sebesar 2 MeV, 2,5 MeV, dan 3 MeV yang telah dilakukan menggunakan PHITS ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan tabel di atas, rasio laju dosis gamma tidak memenuhi ketentuan IAEA. Rasio laju dosis gamma pada modifikasi 1 masih berada di atas ketentuan IAEA pada ketiga variasi energi. Sedangkan pada modifikasi 2 hanya pada energi 3 MeV. Meskipun belum mencapai kriteria, hasil tersebut masih layak untuk digunakan karena sudah cukup dekat dengan kriteria. Pada desain modifikasi 2 hampir semua parameter berkas keluaran telah memenuhi standar

IAEA. Berdasarkan pemenuhan kriteria dosis sinar gamma, kolom termal modifikasi 2 lebih baik dari pada modifikasi 1.

Tabel 2. Hasil akhir simulasi parameter berkas

Parameter	Rekomendasi IAEA	Hasil simulasi					
		Modifikasi 1			Modifikasi 2		
		2 MeV	2.5 MeV	3 MeV	2 MeV	2.5 MeV	3 MeV
Φ_{epi}	$> 1,0 \times 10^9$	1.19×10^9	1.11×10^9	1.00×10^9	1.78×10^9	1.46×10^9	1.64×10^9
\dot{D}_f/Φ_{epi}	$< 2,0 \times 10^{-13}$	1.23×10^{-13}	1.27×10^{-13}	1.36×10^{-13}	0.38×10^{-13}	0.54×10^{-13}	0.81×10^{-13}
$\dot{D}_\gamma/\Phi_{epi}$	$< 2,0 \times 10^{-13}$	2.35×10^{-13}	4.62×10^{-13}	5.65×10^{-13}	1.72×10^{-13}	1.91×10^{-13}	2.85×10^{-13}
Φ_{th}/Φ_{epi}	$< 0,05$	0.0017	0.0067	0.0013	0.016	0.017	0.017
J_{tot}/Φ_{tot}	$> 0,7$	5.28	3.81	4.49	8.17	10.8	8.11

SIMPULAN

Keluaran berkas radiasi dari desain modifikasi 1 dan 2 ditunjukkan dalam lima parameter yaitu fluks neutron epitemal, laju dosis neutron cepat per fluks neutron epitemal, laju dosis gamma per fluks neutron epitemal, rasio antara fluks termal dan epitemal, dan rasio antara arus neutron dan fluks neutron total. Fluks neutron epitemal menurun seiring dengan peningkatan ketebalan material yang diakibatkan oleh interaksi dengan grafit. Timbal mampu menahan sinar gamma yang mengakibatkan komponen laju dosis gamma hasil simulasi mengalami penurunan. Parameter keluaran dari modifikasi desain ini tidak sepenuhnya memenuhi kriteria yang ditentukan IAEA. Namun, desain ini masih layak untuk digunakan. Modifikasi 2 dengan energi 2 MeV dan 2.5 MeV adalah modifikasi terbaik karena seluruh parameter ketentuan IAEA terpenuhi.

REFERENSI

- Agosteo, S., Foglio Para, A., Gambarini, G., Casalini, L., Burn, K., Tinti, R., . . . Nava, E. (2001). *Design of neutron beams for boron neutron capture therapy in a fast reactor (IAEA-TECDOC--1223)*. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Baskar, R., Lee, K. A., & Yeoh, K.-W. (2012). Cancer and Radiation Therapy: Current Advances and Future Directions. *Int J Med Sci.*, 193–199.
- Fauziah, N., Widiharto, A., & Sardjono, Y. (2013). A conceptual design of neutron collimator in the thermal column of kartini research reactor for in vitro and in vivo test of boron neutron capture therapy. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, 112-119.
- Jalut, L. S., Rupiasih, N. N., & Sardjono, Y. (2020). Analisis Dosis Boron pada Teknik BNCT dengan Metode Simulasi Menggunakan Program PHITS (Particle and Heavy Ion Transport Code System). *Buletin Fisika*, 1-7.
- Kim, J. H., Jenrow, K. A., & Brown, S. L. (2014). Mechanisms of radiation-induced normal tissue toxicity and implications for future clinical trials. *Radiat Oncol J.*, 103–115.
- Malouff, T. D., Seneviratne, D. S., Ebner, D. K., Stross, W. C., Waddle, M. R., Trifiletti, D. M., & Krishnan, S. (2021). Boron Neutron Capture Therapy: A Review of Clinical Applications. *Front. Oncol.*
- Muslih, M. I., Sardjono, Y., & Widiharto, A. (2014). Perancangan kolimator di beam port tembus reaktor kartini untuk boron neutron capture therapy. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah - Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, 163-178. Yogyakarta: BATAN.

- Nurlaili, F., Azam, M., Firduasi, K. S., & Widarto. (2008). Optimasi shielding neutron pada thermalizing column reaktor kartini. *Berkala Fisika*, 119-125.
- Pertiwi, I. N., & Purnami, S. W. (2020). Regresi Cox Proportional Hazard Untuk Analisis Survival Pasien Kanker Otak di C-Tech Labs Edwar Technology Tangerang. *Inferensi*, 65-72.
- Pramusinta, R., Zailani, R., & Sardjono, Y. (2019). Dose Analysis in Boron Neutron-capture Cancer Therapy (BNCT) Neutron Generator Based for Breast Cancer. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Application*, 8-11.
- Priambodo, G., Nugroho, F., Palupi, D. S., Zailani, R., & Sardjono, Y. (2017). Optimization of biological shield for boron neutron capture cancer therapy (bnct) at kartini research reactor. *ournal Technology Reaktor Nuklir*, 139-148.
- Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Furuta, T., . . . Sihver, L. (2015). Overview of particle and heavy ion transport code system PHITS. *Annals of Nuclear Energy*, 110-115.
- Shalbi, S., Sazali, N., & Salleh, W. W. (2020). A significant review on beam optimization for boron neutron capture therapy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 062021.
- Stone, H. B., Coleman, C. N., Anscher, M. S., & McBride, W. H. (2003). Effects of radiation on normal tissue: consequences and mechanisms. *Lancet Oncol*, 529-36.
- Vallenry, B. Y., Widiharto, A., & Sardjono, Y. (2012). Pemodelan kolimator di radial beam port reaktor kartini untuk boron neutron capture therapy. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, 11-20.
- Wahyuni, N. S., & Sarjono, Y. (2018). Assesment of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT): Compact Neutron Generators. *Indonesian Journal of Physics and Nuclea rApplications*, 36-42.