

# Modification of Materials and Thickness Layer of Radial Piercing Beampoint (RPB) Reflector on Kartini Reactor for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

Octaviana Erawati F, Riyatun, dan Suharyana

Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir Sutami 36 A Surakarta

octavianaerfa@gmail.com

Received 9-01-2015, Revised 6-04-2015, Accepted 8-04-2015, Published 30-04-2015

## ABSTRACT

Modification of materials and thicknesses reflector RPB of Kartini reactor has been done to support cancer therapy with BNCT method. Modifications have been investigated by computer simulation method based on software MCNP5. Neutron beam for BNCT must be fulfill the criteria recommended by International Atomic Energy Agency (IAEA), two of which are  $\Phi_{epithermal} > 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  and  $\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal} < 0,05$ . Before the modification of the neutron beam done, the measurements in the end of the RPB indicate that  $\Phi_{epithermal} = 8,55 \times 10^{07} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  and  $\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal} = 2,91$ . These conditions were not fulfilling the requirements of the IAEA, so that the modification of the reflector material and thickness layer of RPB should be done. Those modifications were done by varying the materials PbF<sub>2</sub>, Pb-nat, <sup>209</sup>Bi, Ni-nat (95%) and Fe-nat. The simulation result showed if the material Ni-nat (95%) on the thickness 1.5 cm was use as a coating material reflector optimally. The results after the modification showed that  $\Phi_{epithermal}$  increased 7,54% with the increase amounted to  $1,14 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .  $\Phi_{thermal}$  decrease 21,45%, then decreasing the value of  $\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal}$  became 1,70. After the modification the results has not yet fulfill the criteria of the IAEA. Because of the reflector was not the only guide neutron beam. Moderator and filter have not been optimized to deliver results for files that match the criteria of the IAEA for BNCT. Therefore, in future studies modified with the addition of a neutron moderator and also filter is expected to help increasing the quantity of  $\Phi_{epithermal}$  and decreasing of  $\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal}$ .

Keywords : BNCT, RPB, reflector, beam neutron, IAEA.

## ABSTRAK

Modifikasi bahan dan ketebalan pelapis reflektor RPB reaktor Kartini telah dilakukan untuk mendukung terapi kanker dengan metode BNCT. Modifikasi dilakukan dengan metode simulasi komputer berbasis perangkat lunak MCNP5. Berkas neutron untuk keperluan BNCT harus memenuhi parameter-parameter yang disyaratkan oleh IAEA, dua diantaranya adalah  $\Phi_{epithermal} > 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  dan  $\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal} < 0,05$ . Sebelum dilakukan modifikasi pengukuran berkas neutron pada ujung RPB menunjukkan bahwa  $\Phi_{epithermal} = 8,55 \times 10^{07} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  dan  $\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal} = 2,91$ . Kondisi tersebut belum memenuhi persyaratan IAEA, sehingga dilakukan modifikasi bahan dan ketebalan pelapis reflektor RPB. Modifikasi dilakukan dengan mengoptimasi bahan pelapis reflektor dengan variasi bahan PbF<sub>2</sub>, Pb-nat, <sup>209</sup>Bi, Ni-nat (95%) dan Fe-nat. Dari hasil simulasi menunjukkan jika material Ni-nat (95%) pada ketebalan 1,5cm merupakan material dengan ketebalan optimum untuk digunakan sebagai bahan pelapis reflektor. Hasil simulasi setelah dilakukan modifikasi pelapis reflektor menunjukkan bahwa  $\Phi_{epithermal}$  meningkat sebesar 7,54% dengan bertambah menjadi sebesar  $1,14 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .  $\Phi_{thermal}$  menurun sebesar 21,45%, sehingga menurunkan nilai

$\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal}$  menjadi sebesar 1,70 . Setelah dilakukan modifikasi hasilnya belum juga memenuhi kriteria IAEA. Hal ini disebabkan karena reflektor bukan merupakan satu-satunya pemandu berkas neutron. Fungsi moderator dan filter belum dioptimalkan untuk memberikan hasil berkas yang sesuai kriteria IAEA untuk BNCT. Oleh karena itu pada penelitian selanjutnya modifikasi dengan penambahan moderator dan juga filter neutron diharapkan dapat membantu meningkatkan kuantitas  $\Phi_{epithermal}$  dan menurunkan  $\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal}$ .

Kata kunci : BNCT, RPB, reflektor, fluks neutron, IAEA.

## PENDAHULUAN

Kanker merupakan penyakit kelainan sel, dimana sel tumbuh secara tidak terkendali karena aktivitas pembelahan sel melebihi batas normal. Jika sel kanker tidak dimatikan, dapat menular ke jaringan terdekat atau menyebar terbawa aliran cairan ke seluruh tubuh<sup>[1]</sup>. Kasus kanker di Indonesia meningkat setiap tahunnya. *World Health Organization* (WHO,2012) menyatakan bahwa dari 250 juta penduduk Indonesia tidak kurang dari 0,12% nya dinyatakan mengidap kanker<sup>[2-4]</sup>. Angka kematian yang disebabkan oleh penyakit ini mencapai 65%. Jenis kanker terbanyak bagi wanita adalah kanker servik, payudara, dan paru-paru, sedangkan untuk pria adalah kanker paru-paru, prostat dan liver<sup>[4]</sup>. WHO juga memprediksikan pada 2020 kasus kanker di Indonesia akan mencapai 366.875 kasus kanker dengan perkiraan kematian sebesar 239.030 kasus<sup>[2,3]</sup>. Oleh karena itu terapi kanker merupakan salah satu bidang penting dalam dunia medis.

Dari fakta di atas maka metode pengobatan kanker terus berkembang. Salah satunya adalah radioterapi, yang memanfaatkan energi radiasi dari unsur dan partikel radioaktif sebagai pembunuh sel kanker. Radiasi dapat menyebabkan kerusakan, kematian bahkan perubahan sifat sel akibat rusaknya ikatan dalam struktur DNA<sup>[5]</sup>. Prinsip keamanan radioterapi sama seperti metode terapi yang lain, yaitu memaksimalkan kerusakan pada jaringan sel kanker dan meminimalkan efek negatif pada sel normal, oleh karena itu radioterapi memiliki acuan dosis tertentu. Kematian sel atau perubahan pada sel, bergantung pada dosis radiasi yang diterapkan. Ionisasi langsung pada DNA oleh radiasi dengan *Linear Energy Transfer* (LET) tinggi akan menyebabkan mutasi DNA, sehingga terjadi gangguan fungsi dan kematian sel atau jaringan<sup>[6,7]</sup>.

Salah satu radioterapi adalah BNCT, yaitu teknik terapi yang memanfaatkan interaksi tangkapan neutron oleh inti  $^{10}\text{B}$  yang akan menghasilkan partikel- $\alpha$  dan inti hasil  $^7\text{Li}$  melalui reaksi  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ <sup>[8]</sup>. Energi partikel- $\alpha$  inilah yang dimanfaatkan untuk merusak sel kanker dalam jaringan tubuh. Jangkauan/*range* partikel- $\alpha$  sangat pendek seukuran dimensi sel, sehingga efek radiasi dapat difokuskan pada sel kanker dan mengurangi efek negatif sel sehat<sup>[9]</sup>. BNCT dilakukan dengan menyuntikan senyawa boron ke dalam sel kanker. Senyawa boron tersebut misalnya Borocaptate Sodium (BSH) dan Boronophenylaine (BPA)<sup>[10]</sup>. Perbandingan konsentrasi serapan senyawa  $^{10}\text{B}$  oleh sel kanker dan sel sehat adalah 10:1, sehingga terapi ini bersifat selektif karena peluang neutron bereaksi dengan  $^{10}\text{B}$  di sel kanker lebih besar daripada sel sehat<sup>[11]</sup>.

Setidaknya dalam BNCT terdapat dua hal penting, yaitu metode penempatan senyawa yang mengandung  $^{10}\text{B}$  ke dalam sel serta penyediaan sumber neutron. Penyediaan sumber neutron merupakan bagian dari makalah ini. Neutron yang diperlukan untuk berinteraksi dengan inti  $^{10}\text{B}$  merupakan neutron termal/energi rendah. Menjadi tantangan tersendiri bahwa banyak kasus kanker terletak di bagian dalam tubuh sehingga secara praktis diperlukan neutron berenergi di atas termal yaitu epitermal. Kajian secara medis mengharuskan peneliti melakukan uji *in vivo* dan *in vitro* sebelum dilakukan uji klinis, maka penyediaan neutron dari reaktor nuklir merupakan pilihan untuk uji pra klinis tersebut.

Pada umumnya neutron berdasarkan energinya dikelompokkan menjadi tiga 3 golongan , yaitu neutron termal, epitermal dan neutron cepat. Rentang energi termal yaitu neutron yang memiliki energi  $< 0,5$  eV. Neutron dengan rentang energi  $0,5$  eV –  $0,01$  MeV diklasifikasikan kedalam neutron epitermal. Sedangkan neutron dengan energi tinggi yaitu  $>0,01$  MeV diklasifikasikan kedalam neutron cepat <sup>[11]</sup>.

Reaksi BNCT memerlukan neutron termal, akan tetapi agar neutron mampu menjangkau bagian dalam dari kulit maka digunakan neutron epitermal. Neutron termal hanya mencapai pada permukaan kulit dan mengalami penurunan secara eksponensial saat memasuki jaringan kulit. Neutron epitermal mampu menempuh jarak 2-3 cm di dalam kulit dan setelah itu juga mengalami penurunan energi secara eksponensial<sup>[9]</sup>.

Kuantitas dan kualitas berkas neutron yang digunakan dalam keperluan BNCT telah diatur oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA) meliputi 5 parameter, yang harus dipenuhi oleh setiap fasilitas pendukung BNCT sehingga aspek kesehatan dan keselamatan baik untuk pekerja maupun pasien iradiasi dapat terpenuhi. Parameter-parameter tersebut disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria IAEA<sup>[9]</sup>

Parameter	Notasi (satuan)	Rekomendasi IAEA
Fluk neutron epitermal	$\Phi_{epithermal}$ ( $n/cm^2 s$ )	$> 1.0 \times 10^9$
Rasio laju dosis neutron cepat dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_f/\Phi_{epithermal}$ ( $Gy cm^2/n$ )	$< 2.0 \times 10^{-13}$
Rasio laju dosis gamma dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_\gamma/\Phi_{epithermal}$ ( $Gy cm^2/n$ )	$< 2.0 \times 10^{-13}$
Rasio antara fluks termal dan epitermal	$\Phi_{thermal}/\Phi_{epithermal}$	$< 0.05$
Rasio antara arus neutron dan fluks neutron	$J/\Phi_{epithermal}$	$> 0.7$

Pada tahun 1990 Whittmore melakukan simulasi BNCT dengan menggunakan sumber neutron dari reaktor nuklir OSU TRIGA MARK II, menyatakan bahwa fluks neutron untuk BNCT optimum tercapai jika reaktor dioperasikan pada daya  $10MW$ <sup>[12]</sup>. Daya reaktor ini cukup tinggi untuk menghasilkan neutron yang cukup banyak. Tujuh tahun berikutnya, Stephen melakukan simulasi BNCT dengan reaktor yang sama tetapi dengan daya operasi  $1MW$ . Modifikasi dengan penambahan  $D_2O$  sebagai moderator, Sulfur dan Lithium Carbonat sebagai filter neutron, menghasilkan fluks neutron epitermal pada orde  $10^8 n.cm^{-2}.s^{-1}$ <sup>[13]</sup>. Hal ini memberikan gambaran bahwa karakteristik berkas neutron mencapai target sangat ditentukan oleh material pemanduan neutron yang digunakan.

Pada tahun 2014 perkembangan penelitian BNCT dari segi penyediaan sumber neutron masih terfokus pada upaya memenuhi ketentuan IAEA. Proses panduan neutron menuju target  $^{10}B$  dilakukan dengan modifikasi bahan material dan ukuran dari reflektor, kolimator, moderator serta filter dari berkas neutron. Kasesaz melakukan penambahan reflektor Pb dan moderator Al, sedangkan untuk filternya digunakan Cd dan Bi. Sumber neutron didapat dari *Tehran Reseach Reactor* (TRR). Penelitian ini menghasilkan fluks neutron epitermal masih pada rentang orde  $10^8 n.cm^{-2}.s^{-1}$ <sup>[14]</sup>. Shaaban dalam penelitiannya juga menghasilkan fluks neutron pada rentang orde  $10^8 n.cm^{-2}.s^{-1}$  dengan menambahkan material yang sama namun dengan menggunakan *Miniatur Neutron Source Reactor* (MNSR)<sup>[15]</sup>.

Penyediaan sumber neutron untuk BNCT di Indonesia masih merupakan penelitian berkelanjutan terpusat di reaktor penelitian Kartini Yogyakarta. Kondisi operasi reaktor Kartini 100 kW, daya ini 10kali lebih rendah dari daya reaktor TRIGA MARK II yang biasa digunakan dalam penelitian-penelitian terkait BNCT. Metode simulasi komputer dilakukan dengan program transport neutron *Monte Carlo N' Particle Code* (MCNP). Simulasi transport neutron dilakukan dengan metode Monte Carlo, yakni menggunakan *random walk* atau langkah-langkah acak dalam merunut perjalanan partikel. Metode ini dapat diaplikasikan untuk menghitung perjalanan partikel dari partikel hidup ketika dilepaskan dari sumbernya sampai partikel mati karena lepas, terserap, dan sebagainya<sup>[16]</sup>. Program MCNP dibuat oleh *Los Alamos National Laboratory*, Los Alamos, New Mexico

Beberapa penelitian telah dilakukan, Muh Ilma melakukan simulasi sebuah kolimator RPB yang menghubungkan teras reaktor ke *aperture* berkas neutron. Material yang digunakan adalah Ni sebagai reflektor, Al sebagai moderator, untuk filter digunakan Boral dan Pb. Pada penelitian ini didapatkan fluks neutron epitermal orde  $10^8 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ <sup>[17]</sup>. Dwi Wahyu melakukan optimasi desain kolimator pada *Radial Piercing Beamport* (RPB). Optimasi dilakukan dengan menambahkan Ni sebagai reflektor,  $^{32}\text{S}$  sebagai moderator dan Cd serta Pb sebagai filter menghasilkan fluks neutron epitermal mencapai orde  $10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ <sup>[18]</sup>. Kedua simulasi belum sepenuhnya menghasilkan karakteristik neutron yang memenuhi kriteria IAEA. Metode simulasi dilakukan secara dua tahap, yaitu tahap perekaman fluks neutron pada pangkal RPB untuk selanjutnya digunakan sebagai acuan sumber neutron yang keluar dari teras reaktor. Dengan pemaksaan dua tahap ini, maka akan mereduksi kemungkinan-kemungkinan yang terjadi secara *riel*. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan simulasi satu tahap dengan harapan akan memberikan hasil yang lebih akurat.

Salah satu komponen penting pada penyediaan berkas neutron adalah reflektor. Reflektor merupakan komponen yang memastikan suatu sistem mampu menjaga kestabilan jumlah neutron di dalam kolimator dipantulkan kembali ke arah semula sehingga neutron tidak bocor keluar dari sistem kolimator. Material yang digunakan juga harus bersifat menyerap foton energi tinggi agar tidak bocor keluar kolimator.

RPB merupakan saluran yang langsung menembus bagian teras reaktor sehingga diharapkan fluks neutron pada saluran ini masih cukup tinggi dibanding dengan saluran lainnya. RPB sejauh ini belum dimanfaatkan untuk keperluan apapun di reaktor Kartini. Untuk menjamin berkas neutron tetap tinggi diujung keluaran *aperture*, maka RPB dilapisi suatu bahan yang mampu memantulkan neutron kembali ke dalam RPB. Material yang cocok digunakan untuk bahan pelapis reflektor adalah material yang memiliki tampang lintang hamburan elastis yang tinggi. Material yang disarankan oleh IAEA sebagai bahan pelapis reflektor diantaranya adalah  $\text{PbF}_2$ , Pb-nat, Ni-nat (95%), Bi-209, dan Fe-nat<sup>[9]</sup>.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Alat dan Perangkat Lunak yang digunakan

Program utama yang digunakan adalah *Monte Carlo N-Particle Code* versi 5 (MCNP5), dengan input ditulis dengan Visual Editor 5-4.23-12N dan Notepad++ v6.0, serta Origin 8 untuk menampilkan grafik. Input file MCNP adalah model dan geometri reaktor Kartini yang telah dipublikasikan oleh Budi Rohman pada Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia seperti yang ditunjukkan pada gambar 1<sup>[19]</sup>. Pada model input ini Reaktor Kartini diasumsikan dalam kondisi bahan bakar baru (*fresh reactor*), semua batang kendali terbenam sempurna.

## Proses Simulasi dan Pengambilan Hasil

Simulasi dilakukan dengan memodifikasi file input ModelR.Kartini\_Budi dengan menambahkan *surface card* dan *cell card*. Penambahan ini dilakukan pada pangkal dan ujung serta beberapa titik disepanjang RPB dengan tujuan untuk mengetahui fluks neutron pada titik-titik tersebut.

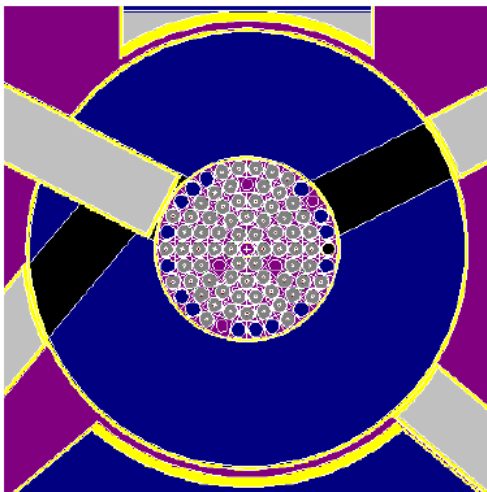
Pendiskripsian hasil untuk simulasi dengan menggunakan MCNP dilakukan dengan menambahkan *syntax* Tally. Pada penelitian ini digunakan tally F4:N untuk memperoleh fluks neutron rata-rata yang melewati suatu volume geometri yang ditentukan. Nilai tersebut menunjukkan jumlah partikel per  $\text{cm}^2$ , dapat dihubungkan dengan daya reaktor (100kW) untuk menentukan laju fisi, sebagai berikut:

$$(10^5 \text{ W}) \left( \frac{1 \text{ J/s}}{\text{W}} \right) \left( \frac{1 \text{ MeV}}{1.602 \times 10^{-13}} \right) \left( \frac{1 \text{ fisi}}{200 \text{ MeV}} \right) = 3,121 \times 10^{15} \frac{\text{fisi}}{\text{s}} \quad (1)$$

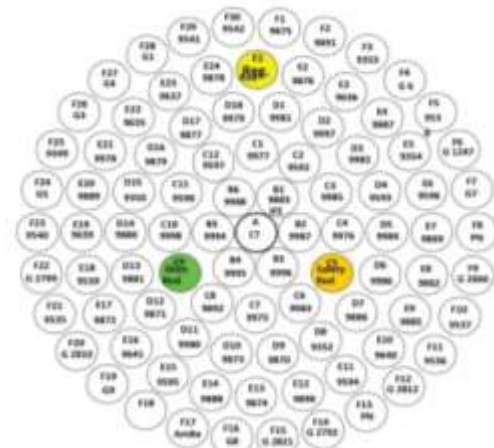
Tiap fisi mengeluarkan rata-rata 2,42 neutron sehingga angka ini sering disebut faktor normalisasi neutron fisi, maka diperoleh :

$$\left( 3,121 \times 10^{15} \frac{\text{fisi}}{\text{s}} \right) \left( 2.42 \frac{\text{n}}{\text{fisi}} \right) = 7.553 \times 10^{15} \text{ n/s} \quad (2)$$

Nilai ini yang kemudian digunakan sebagai faktor multiplikasi untuk Tally 4<sup>[20]</sup>.



Gambar 1. ModelR.Kartini\_Budi <sup>[19]</sup>



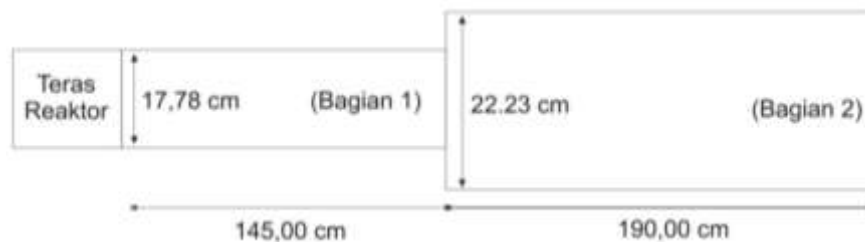
Gambar 2. Konfigurasi Teras Reaktor Kartini <sup>[21]</sup>

## Validasi ModelR.Kartini\_Budi

Validasi secara simulasi dilakukan dengan memastikan jika ModelR.Kartini\_Budi memiliki  $k_{eff}=1,00$ . Kondisi ini didapat dengan mengatur posisi batang kendali dengan cara menaikkan atau menurunkan batang kendali. Validasi juga dilakukan dengan mengukur fluks neutron pada masing-masing ring pada teras reaktor dan membandingkan hasil simulasi ModelR.Kartini\_Budi dengan eksperimen langsung pada reaktor Kartini. Posisi masing-masing ring ditunjukkan pada gambar 2.

## Modifikasi RPB

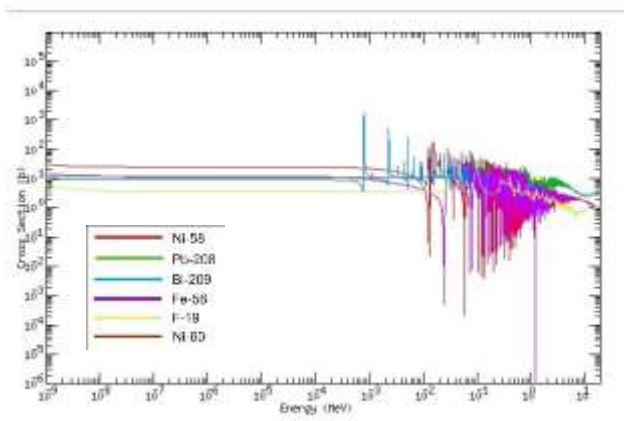
RPB Model R.Kartini\_Budi sebelum dilakukan modifikasi ditunjukkan oleh gambar 3. Bagian pertama merupakan bagian yang menembus langsung ke teras reaktor, berbentuk tabung dengan panjang 145 cm dan diameter 17,78 cm. Bagian kedua merupakan bagian yang berada dalam kungkungan lapisan beton, memiliki panjang 190 cm dan diameter 22,23 cm. Modifikasi dilakukan pada bagian 2, hal ini dilakukan untuk menjaga agar neutron tidak hilang keluar dari sistem RPB, sehingga fluks neutron tetap terjaga sampai ujung aperture. Modifikasi dilakukan terhadap material pelapis reflektor kolimator, dan ketebalan dari material tersebut.



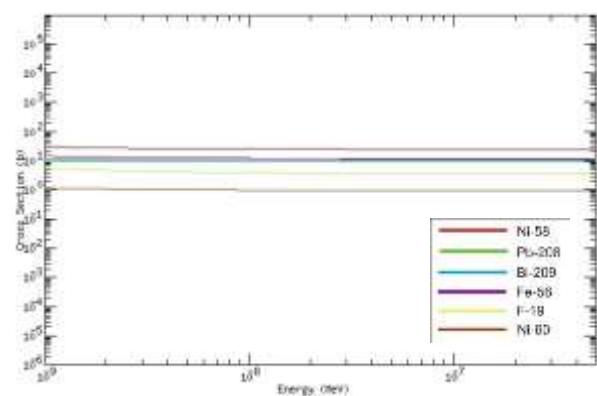
Gambar 3. RPB Model R.Kartini\_Budi

## Modifikasi Material Pelapis Reflektor Kolimator

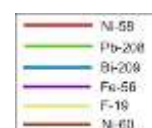
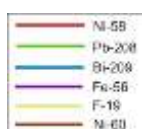
Dalam rangka menentukan bahan material yang sesuai, maka dilakukan variasi bahan material reflektor sesuai yang direkomendasikan IAEA yaitu  $\text{PbF}_2$ , Pb-nat, Ni-nat (95%), Bi-209, dan Fe-nat. Ni-nat (95%), memiliki material pengotornya antara lain  $^{55}\text{Mn}$  1,5%, Fe-nat 1%, Si-nat 0,5%, Cu-nat 1%,  $^{12}\text{C}$  0,5%, Ti-nat 0,1%. Tebal lapisan dibuat sama sebesar 1,5 cm. Material-material yang direkomendasikan IAEA memiliki tampang lintang hamburan elastis terhadap neutron yang cukup besar, seperti Gambar 4a s.d 4d.

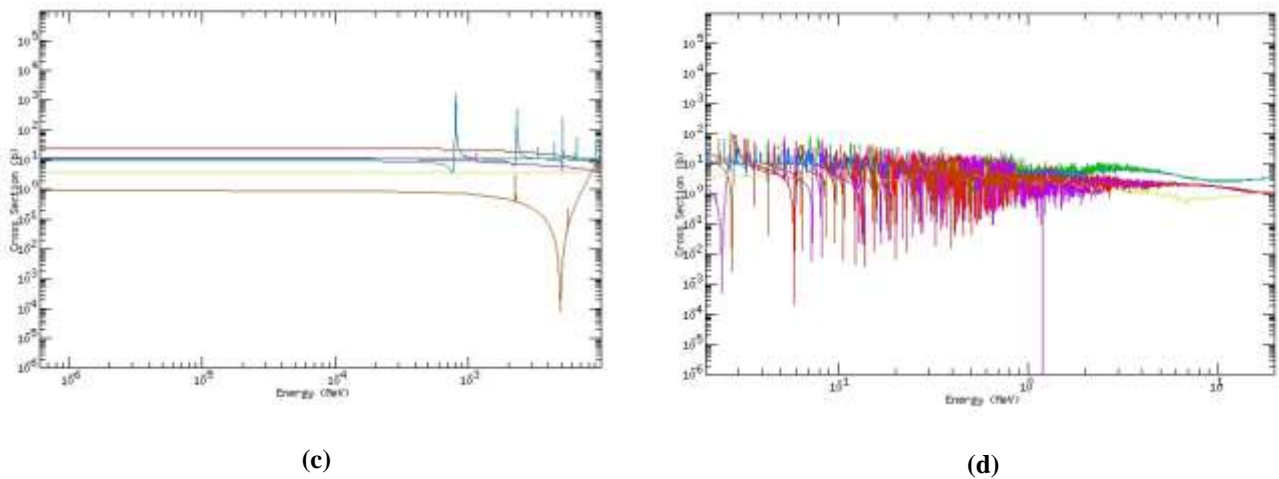


(a)



(b)





**Gambar 4.** (a) Kurvaampang lintang elastis, (b) Kurvaampang lintang elastis rentang energi termal, (c) Kurvaampang lintang elastis rentang energi epitermal, (d) Kurvaampang lintang elastis rentang energi cepat <sup>[23]</sup>

### Modifikasi ketebalan bahan pelapis paling optimum

Setelah didapatkan material yang sesuai untuk bahan pelapis reflektor. Langkah terakhir adalah dilakukan optimasi ketebalan bahan pelapis reflektor. Optimasi dilakukan dengan memvariasikan ketebalan bahan pelapis dari 0,5cm – 6,0cm.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Validasi File Input Geometri Reaktor

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai kritikalitas ( $k_{eff}$ ) dari file input adalah  $(1,00749 \pm 0,00045)$ , sedangkan nilai acuan reaktor ideal adalah  $(1,00 \pm 0,01)$ . Evaluasi terhadap nilai ini menunjukkan selisih nilai sebesar 0.00749. Nilai ini dapat diterima karena reaktor dengan  $k_{eff} > 1$  dapat dikendalikan dengan batang kendali. Dalam hal ini didapatkan posisi optimum untuk batang kendali adalah ketika batang pengawas ditarik 100%, batang kompensasi ditarik 80% dan batang pengatur dibenamkan 26.67% .

Fluks neutron pada berbagai ring sesuai geometri reaktor di Gambar 1 ditampilkan pada Tabel 3.

**Tabel 2.**Fluks neutron pada Ring B,C,D dan F

Posisi bahan bakar	Fluks neutron rata-rata ( $n/cm^2s$ )		Selisih Relatif (%)
	Eksperimen <sup>[22]</sup>	Simulasi	
Ring B	$1,78 \times 10^{12}$	$1,87 \times 10^{12}$	5,06
Ring C	$1,56 \times 10^{12}$	$1,47 \times 10^{12}$	5,77
Ring D	$1,14 \times 10^{12}$	$1,19 \times 10^{12}$	4,38
Ring F	$1,12 \times 10^{12}$	$1,02 \times 10^{12}$	8,93

Terdapat selisih rata-rata maksimum sebesar 6,03%. Selisih ini dapat muncul karena kondisi bahan bakar pada simulasi adalah *fuel fresh*, sedangkan eksperimen dilakukan setelah bahan bakar mengalami operasi reaksi fisi. Demikian pula pada eksperimen tidak dicantumkan posisi

batang kendali. Selisih maksimum kurang dari 10 % menyimpulkan bahwa file input tervalidasi cukup baik.

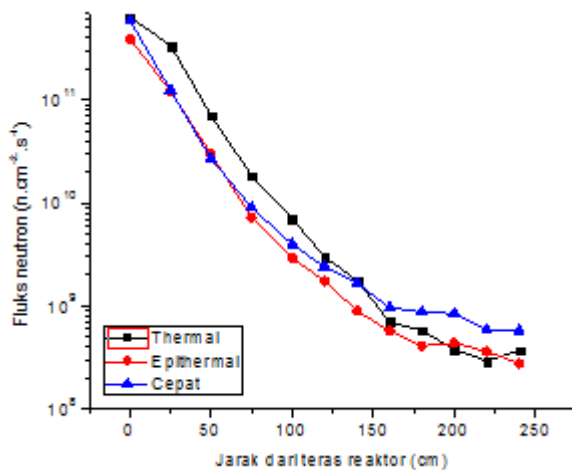
### Pengaruh Reflektor RPB terhadap Fluks Neutron

Pengurangan fluks neutron dapat diakibatkan oleh interaksi neutron dengan material-material penyusun RPB. Selain itu, RPB melewati lapisan pendingin reaktor atau kolam air dan kungkungan beton sehingga neutron banyak yang termoderasi. Adanya kebocoran neutron juga dapat menyebabkan pengurangan fluks neutron. Tabel 3 menunjukkan penurunan fluks neutron sepanjang perjalanannya melintasi RPB dari hasil simulasi menggunakan ModelR.Kartini\_Budi. Tabel 3 menunjukkan jika penurunan rata-rata fluks neutron dari pangkal RPB sampai ujung RPB adalah sebesar 99,96%.

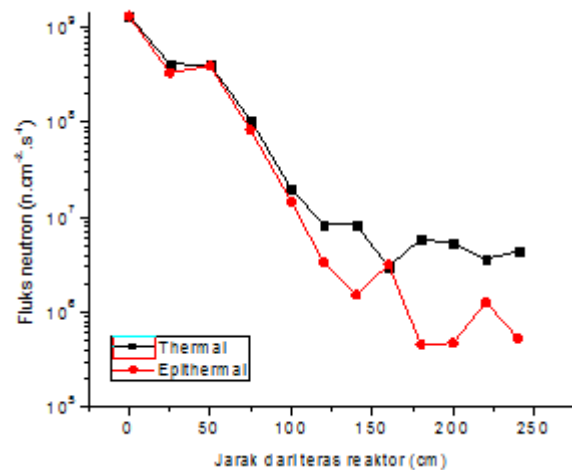
Tabel 3. Fluks neutron pada pangkal & ujung *beamport* sebelum dilakukan optimasi

Posisi	Fluks neutron (n/cm <sup>2</sup> s)		
	Termal	Epitermal	Cepat
Pangkal RPB	$6.16 \times 10^{11}$	$2.88 \times 10^{11}$	$5.64 \times 10^{11}$
Ujung RPB	$2.49 \times 10^{08}$	$8.55 \times 10^{07}$	$2.97 \times 10^{08}$

Pada gambar 5a terlihat bahwa dari hasil simulasi, fluks neutron termal, epitermal maupun cepat mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya jarak dari teras reaktor. Penurunan neutron cenderung memiliki trend yang sama. Penurunan rata-rata fluks tersebut mencapai orde  $10^{-4} \text{ ncm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  pada jarak 240cm dari teras reaktor. Gambar 5b menunjukkan penurunan fluks neutron dari hasil eksperimen yang mencapai orde  $10^{-3} \text{ ncm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

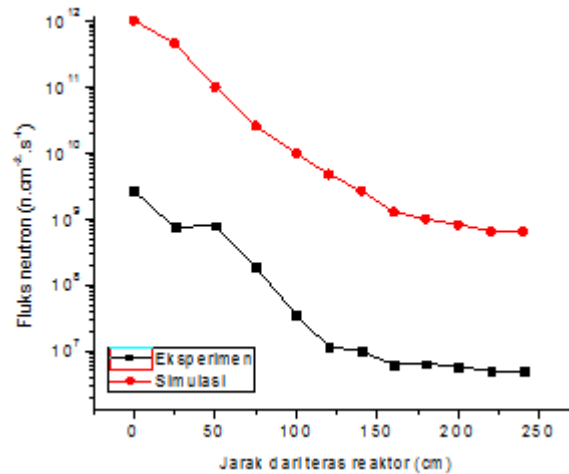


(a)



(b)





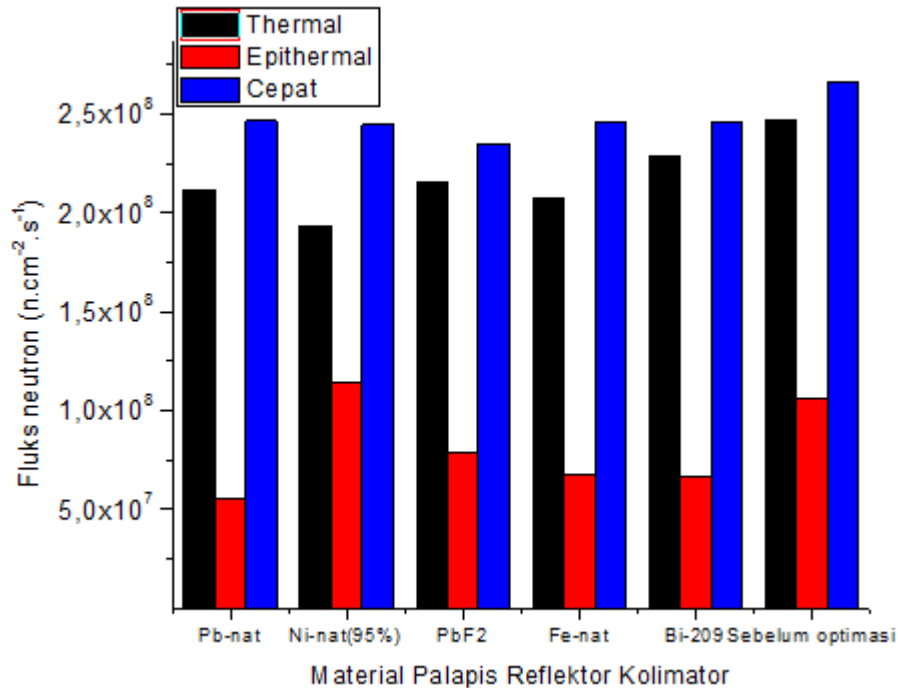
(c)

**Gambar 5.** (a) Penurunan fluks neutron dari hasil simulasi menggunakan MCNP5, (b) Penurunan fluks neutron dari hasil eksperimen<sup>[24]</sup>, (c) Penurunan fluks neutron total dari hasil simulasi dan eksperimen

Gambar 5c menunjukkan jika fluks neutron untuk hasil eksperimen lebih rendah  $10^3$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> dari hasil simulasi. Namun, terlihat jika hasil simulasi memiliki *trend* yang identik dengan *trend* hasil eksperimen, sehingga hasil ini dapat digunakan sebagai hasil pendekatan. Sedangkan untuk penyimpangan diduga disebabkan oleh adanya kebocoran fluks neutron yang terjadi pada kondisi *real*.

### Hasil Optimasi Reflektor RPB

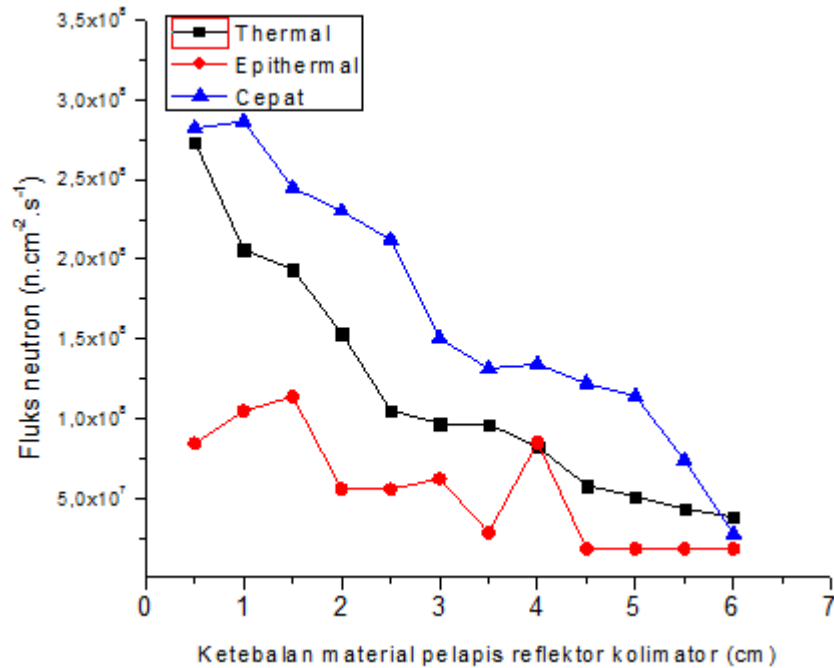
Hasil simulasi menunjukkan bahwa material Ni-nat (95%) merupakan material yang paling optimal untuk digunakan sebagai material pelapis reflektor. Hasil tersebut disajikan pada gambar 6, dimana material Ni-nat (95%) memiliki fluks neutron paling tinggi jika dibandingkan dengan material lain dan sebelum dilakukan optimasi. Dengan menghitung selisih relatif fluks neutron dari sebelum dan setelah ditambahkan material pelapis maka gambar 6 juga menunjukkan bahwa material Ni-nat (95%) mampu meningkatkan fluks neutron epitermal sebesar 7,54%. Peningkatan fluks neutron epitermal dapat disebabkan oleh adanya sumbangan neutron cepat yang termoderasi ketika melewati daerah resonansi dari material Ni-nat (95%). Untuk material lain, justru menunjukkan penurunan mencapai 26,13% - 47,26% dari sebelum ditambahkan material tersebut. Disamping itu material Ni-nat (95%) juga mampu menurunkan fluks neutron termal mencapai 21,45%, dan material lain hanya sebesar 7,28% - 16,19% saja. Penurunan dari fluks neutron cepat untuk material Ni-nat (95%) juga tidak terlalu signifikan hanya sebesar 7,89%. Sehingga hal ini akan menguntungkan ketika dilakukan optimasi moderator pada penelitian selanjutnya.



**Gambar 6.** Fluks neutron pada ujung beamport sebagai fungsi material penyusun reflektor

Analisis berdasarkan data tampang lintang pada gambar 4b juga menunjukkan jika material  $^{58}\text{Ni}$  memiliki tampang lintang hamburan elastis terbesar jika dibandingkan dengan material lain yaitu sebesar 26,25 barn pada rentang energi termal <sup>[23]</sup>. Tampang lintang hamburan elastis untuk rentang energi epitermal ditunjukkan oleh gambar 4c. Material  $^{209}\text{Bi}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ , dan  $^{56}\text{Fe}$  pada kisaran energi  $10^{-3}$  MeV telah mengalami resonansi, artinya pada energi tersebut ketiga material akan memoderasi/menurunkan energi neutron. Material  $^{19}\text{F}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ , dan  $^{208}\text{Pb}$  pada rentang energi epitermal belum mengalami resonansi, ini artinya untuk ketiga material ini masih menghamburkan neutron epitermal tanpa menurunkan energi dari neutron tersebut. Hal ini sesuai dengan hasil yang ditunjukkan oleh gambar 6, dimana untuk material Ni-nat (95%) dan PbF2 memiliki fluks neutron epitermal yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan ketiga material lain. Dari hasil analisis tampang lintang dan hasil simulasi maka diputuskan penggunaan material Ni-nat (95%) sebagai material pelapis reflektor kolimator.

Optimasi selanjutnya adalah pemilihan ketebalan Ni-nat (95%) yang optimum untuk disain kolimator pada model reaktor Kartini. Langkah ini dilakukan melihat pada penelitian sebelumnya, untuk disain yang berbeda ketebalan dinding kolimator juga akan berbeda. Optimasi ini dilakukan dengan memvariasi ketebalan Ni-nat (95%) sehingga diperoleh fluks neutron epitermal yang optimum. Hasil optimasi ketebalan Ni-nat (95%) dapat dilihat pada gambar 7.



**Gambar 7.** Hasil optimasi ketebalan Ni-nat (95%) pada bagian ujung RPB

Gambar 7 menunjukkan jika fluks neutron epitermal mencapai kondisi maksimum pada ketebalan 1,5cm yaitu sebesar  $1,14 \times 10^{08} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Hasil ini diambil pada bagian ujung RPB. Jika dilakukan tinjauan lebih dalam lagi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4 penurunan rata-rata fluks neutron dari pangkal RPB hingga ujung RPB setelah dilakukan optimasi bahan dan ketebalan pelapis reflektor masih sangat besar yaitu sebesar 99,96%. Penurunan ini dapat disebabkan oleh adanya material-material pengotor pada Ni-nat (95%) yang memiliki tampang lintang serapan yang cukup besar.  $^{55}\text{Mn}$ , dan  $^{48}\text{Ti}$  memiliki tampang lintang serapan berturut-turut sebesar 13,410 barn dan 7,843 barn<sup>[23]</sup>. Sehingga  $^{55}\text{Mn}$ , dan  $^{48}\text{Ti}$  dapat mengabsorpsi neutron dan menurunkan fluks neutron.

**Tabel 4.** Fluks neutron pada pangkal dan ujung RPB setelah dilakukan optimasi

Posisi	Fluks neutron (n/cm <sup>2</sup> s)		
	Termal	Epitermal	Cepat
Pangkal RPB	$6,16 \times 10^{11}$	$2,88 \times 10^{11}$	$5,64 \times 10^{11}$
Ujung RPB	$1,94 \times 10^{08}$	$1,14 \times 10^{08}$	$2,45 \times 10^{08}$

Penambahan reflektor sejauh ini belum membuat fluks neutron epitermal pada ujung RPB memenuhi kriteria yang disyaratkan oleh IAE. Akan tetapi dari hasil simulasi menunjukkan bahwa material Ni-nat(95%) merupakan material yang cocok digunakan sebagai bahan pelapis reflektor dan ketebalan 1,5 cm merupakan ketebalan optimum untuk menghasilkan fluks neutron epitermal yang maksimum.

## KESIMPULAN

Optimasi bahan dan ketebalan reflektor RPB yang dilakukan dengan metode simulasi ModelR.Kartini\_Budi dengan menggunakan MCNP5 belum menghasilkan fluks neutron yang memenuhi kriteria yang ditetapkan oleh IAEA. Akan tetapi dari hasil simulasi ini didapatkan bahwa material Ni-nat (95%) cocok digunakan sebagai bahan pelapis reflektor. Pada ketebalan 1,5cm, Ni-nat (95%) mampu menghasilkan fluks neutron epitermal yang optimum yaitu sebesar  $1,14 \times 10^8 \text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  dengan kenaikan sebesar 7,54% dari sebelum ditambahkan material tersebut.

## SARAN

Faktor multiplikasi untuk Tally F4 perlu dilakukan kajian ulang. Kondisi pada saluran RPB bisa diasumsikan dalam kondisi menuju vakum, sehingga dapat meminimalisir adanya tumbukan neutron dengan atom-atom udara pada saluran RPB. Penggunaan jumlah neutron tiap siklus (nrsck) pada scribd program perlu divariasikan terlebih dahulu untuk mendapatkan sebaran data yang lebih stabil.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih penulis ucapkan kepada Pak Aziz salah satu staf ahli BAPETEN, yang telah memberikan izin dalam penggunaan model reaktor Kartini yang telah dikembangkannya bersama tim, serta pemberian izin untuk penggunaan software MCNP5.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1 UK, Cancer Research. (2014). *What is cancer*. Dipetik Oktober 2014, dari Cancer Research UK: <http://www.cancerresearchuk.org>
- 2 Ferlay, J., Soerjomataram, I., Dikshit, R., Mathers, C., Rebelo, M., Parkin, D., et al. (2014). Cancer Incidence and Mortality Worldwiew. *International Journal of Cancer*.
- 3 Ferlay, J., Soerjomataram, I., Ervik, M., Dikshit, R., Eser, S., Mather, C., et al. (2012). *Cancer Incidence and Mortality Worldwide: IARC Cancer Base No. 11*. IARC.
- 4 Lyon. (2013). *International Agency for Research on Cancer*. Dipetik Desember 2014, dari GLOBOCAN: <http://globocan.iarc.fr>
- 5 Susworo, Hutagalung, E. U., Diligo, I. H., & Kamal, A. F. (2013, Mei). Dasar-Dasar Radiasi: Mekanisme Radiasi dan Pengaruhnya terhadap DNA serta Jaringan Tulang. *Indonesian Journal of Cancer*, 7, 73-78.
- 6 Susworo. (2007). *Radioterapi dasar-dasar radioterapi tata laksana radioterapi*. Jakarta: UI-Press.
- 7 Lusiyanti, Y., & Syaifudin, M. (2008). Penerapan efek interaksi radiasi dengan. *JFN*, 2, 1-12.
- 8 Tahara, Y., Oda, Y., Shiraki, T., Yokobori, H., & Nakamura, T. (2006). Engineering Design of a Spallation Reactio-Based Neutron Generator for Boron Neutron Capture Therapy. *Journal of Nuclear Science and Thecnology*, 43, 9-19.
- 9 IAEA. (2001). *CURRENT STATUS OF NEUTRON CAPTURE THERAPY*. Viena: IAEA,ISSN 1011-4289.
- 10 Tetsuya, M., & Tetsuo, M. (2011). Progress in nuclear science and thecnology. Study on microdosimetry for boron neutron capture therapy. 2-242.
- 11 Wolfgang, A., Sauerwein, Pierre, M., & Andre, W. (2013). Neutron capture therapy. Drugs for BNCT. 117-161.

- 12 Whittmore, W. (1992). A Compact TRIGA reactor for Boron neutron capture therapy. *Progress in Neutron Capture Therapy for Cancer* (hal. 57-62). New York: Plenum Press.
- 13 Stephen, E. B. (1997). *Epithermal neutron beam design at the Oregon State University TRIGA MARK-II reactor (OSTR) Based on Monte Carlo Methods*. Kanokrat Tiyaupun.
- 14 Kasesaz, Y., Khalafi, H., & Rahmani, F. (2014). Design of an epithermal neutron beam for BNCT in thermal column of Tehran research reactor. *Annals of Nuclear Energy, Elsevier*, 234-238.
- 15 Shaaban, I., & Albarhoum, M. (2015). Design calculation of an epithermal neutronic beam for BNCT. *Progress in Nuclear Energy, Elsevier*, 297-302.
- 16 X-5 Monte Carlo Team. (1987). *MCNP-A general Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 5 Volume 1; Overview and Theory*. Mexico: Los Alamos National Laboratory
- 17 Muhammad, I. (2013). *Perancangan kolimator di beamport tembus reaktor Kartini untuk boron neutron capture therapy*. Skripsi. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- 18 Wahyuningsih, D. (2014). *Optimasi Desain Kolimator Untuk Uji In Vivo Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) pada Beamport Tembus Reaktor Kartini menggunakan Simulasi MCNP5*. Thesis. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada.
- 19 Rohman, Budi. (2009). Koefisien Reaktivitas Temperature bahan Bakar Reaktor Krtini. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, X, 2, 59-70
- 20 John, R. L., & Anthony, J. B. (t.thn.). *Introduction to Nuclear Engineering*. New Jersey: Pentice Hall.
- 21 PSTA. (2005). *Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Kartini*. Yogyakarta: PSTA-BATAN
- 22 Widarto, Mulyadi, E., Purwadi, I., (2014). Kajian Awal Pengembangan Fasilitas Uji In Vitro/In Vivo Metode Boron Neutron Capture Cancer Therapy Dengan Memanfaatkan Potensi Alternatif Berbagai Fasilitas Iradiasi untuk Pendayagunaan Reaktor Triga Kartini. Laporan Penelitian, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jakarta.
- 23 Soppera, N., Dupont, E., & Bossant, M. (2012). *JANIS BOOK of Neutron-induced cross section*. OECD NEA Data Bank.
- 24 Yusman, A. W., & Widyatmojo, Y. (2011). Penentuan karakteristik rapat daya reaktor Kartini. *Prosiding seminar nasional ke-17 teknologi keselamatan PLTN serta fasilitas nuklir* (hal. 195-205). Yogyakarta: PSTA\_BATAN.