

# OPTIMASI *SHIELDING* NEUTRON PADA *THERMALIZING COLUMN* REAKTOR KARTINI

Fidayati Nurlaili<sup>1</sup>, M. Azam<sup>2</sup>, K. Sofjan Firdausi<sup>2</sup>, Widarto<sup>3</sup>

1. Mahasiswa Universitas Diponegoro, 2. Dosen dan Peneliti di Jurusan Fisika  
Universitas Diponegoro, 3. Peneliti di bidang reaktor BATAN

## INTISARI

Telah dilakukan optimasi perisai dan perhitungan nilai terhadap fluks neutron yang keluar melalui Kolom termalisasi reaktor Kartini

Fluks neutron akan mengalami pengurangan secara eksponensial ketika dilewatkan pada suatu bahan perisai. Pada Kolom termalisasi reaktor Kartini terdapat berbagai macam perisai diantaranya grafit, lead, parafin dan ruang kosong yang berisi udara, sehingga dapat dihitung besar fluks neutron yang keluar melalui Kolom termalisasi. Dilakukan juga optimasi terhadap perisai-perisai dalam Kolom termalisasi sehingga menghasilkan fluks neutron terkecil.

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai fluks neutron yang keluar melalui Kolom termalisasi adalah sebesar  $2,681.10^{-11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Setelah dilakukan optimasi, fluks neutron yang tersisa setelah melewati Kolom termalisasi yaitu sebesar  $1,042.10^{-28}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Kata kunci: Kolom termalisasi, perisai, fluks neutron

## *Abstract*

*Shield optimization and the calculation of neutron flux the coming out of the thermalizing column of the Kartini reactor have been conducted.*

*The neutron flux will decrease exponentially as it passes the thermalizing column. The thermalizing column of Kartini reactor consists of many different kinds of shields, i.e, graphite, lead, paraffin and an empty chamber of air, therefore the neutron flux count that is coming out of the thermalizing column can be calculated and the shields within the column can be optimized to give smaller neutron flux.*

*Calculation result indicates that the neutron flux coming out of the thermalizing column is  $2,681.10^{-11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . After optimization, the remaining flux coming out of the thermalizing column is  $1,042.10^{-28}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .*

*Key words: thermalizing column, Shield, neutron flux*

## PENDAHULUAN

Neutron adalah radiasi zarah tak bermuatan, yang merupakan jenis radiasi yang sangat berbahaya. Neutron mempunyai jangkauan yang panjang seperti sinar- $\gamma$ .

Walau neutron tidak bermuatan listrik, namun neutron mampu mengionisasi bahan yang dilaluinya melalui ionisasi sekunder(Alkhadi,1997).

Radiasi pengion dapat menimbulkan efek biologi jika berinteraksi dengan manusia. Gangguan kesehatan dalam bentuk apapun yang merupakan akibat dari paparan radiasi bermula dari interaksi antara radiasi pengion dengan sel maupun jaringan tubuh manusia. Akibat interaksi tersebut maka sel-sel dapat mengalami perubahan struktur dari struktur normal semula. Oleh karena itu diperlukan perisai radiasi untuk tujuan proteksi radiasi(Alkhadi,1997).

Dalam Peraturan Pemerintah RI no.63 tahun 2000 tentang keselamatan dan kesehatan terhadap radiasi pengion, pada bab III pasal 3 disebutkan bahwa untuk menjamin keselamatan dan kesehatan pekerja, masyarakat dan lingkungan hidup, maka penguasaan instalasi yang melaksanakan setiap kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir yang dapat mengakibatkan penerimaan dosis radiasi harus memenuhi prinsip-prinsip keselamatan dan kesehatan sebagai berikut :

- a. Setiap pemanfaatan tenaga nuklir harus mempunyai manfaat lebih besar dibanding resiko yang ditimbulkan.
- b. Penerimaan dosis radiasi terhadap pekerja atau masyarakat tidak melebihi nilai batas dosis yang ditetapkan oleh badan pengawas.
- c. Kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir harus direncanakan dan sumber radiasi harus dirancang dan dioperasikan untuk menjamin agar paparan radiasi yang terjadi ditekan serendah-rendahnya

(Wardhana,2007)

Oleh karena itu, untuk menghindari paparan langsung terhadap radiasi neutron diperlukan perisai neutron.

## **METODE PENELITIAN**

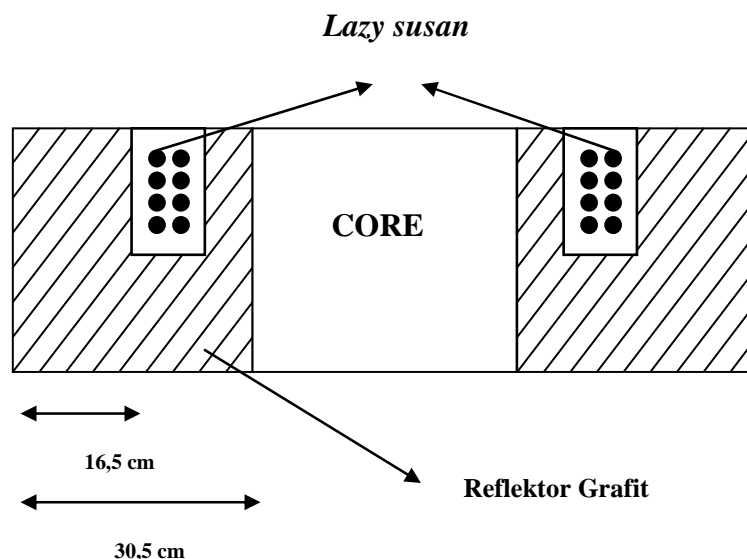
### **1. Menghitung fluks neutron mula-mula.**

Fluks neutron mula-mula yang dimaksud disini yaitu fluks neutron sebelum melewati *thermalizing column*. Karena reaktor sedang tidak beroperasi, maka data besarnya fluks neutron diambil dari penelitian Ery rahmawati, mahasiswi UNY (Universitas Negeri Yogyakarta) yang melakukan pemetaan fluks neutron di reaktor kartini yaitu dengan judul penelitian “Pemetaan Fluks neutron Thermal

pada Fasilitas Iradiasi Lazy Susan”. Karena kolom termalisasi terletak di sebelah selatan, maka nilai fluks neutron yang diambil juga data fluks neutron yang memancar kearah selatan dengan daya pada saat reaktor dioperasikan adalah daya maksimal dari reaktor kartini yaitu sebesar 100Kwatt. Perhitungan dan ralat berbobot dari fluks neutron yang mengarah ke arah selatan dapat dilihat pada lampiran C.

## 2. Menghitung besar fluks neutron ketika melewati reflektor grafit.

Sebelum memasuki kolom termalisasi, fluks neutron dari *lazy susan* terlebih dahulu melewati reflector grafit setebal 16,5 cm.



Gambar 3.1. penampang teras dan reflector.

Sehingga sebelum memasuki kolom termalisasi, fluks neutron sudah mengalami pengurangan terlebih dahulu, besar fluks neutron setelah melewati reflector grafit dapat dilihat pada lampiran D.

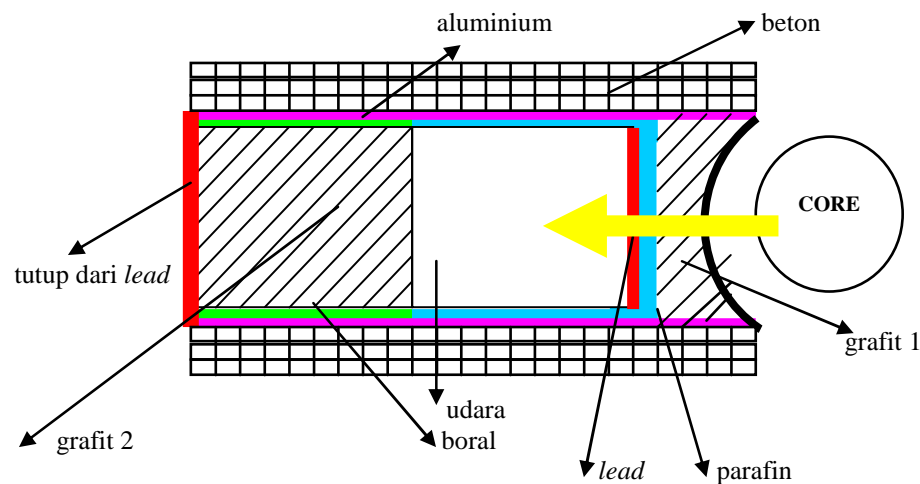
## 3. Mengoptimasi *shielding* neutron dalam *thermalizing column*

Optimasi perisai dalam *thermalizing column* dilakukan dengan memvariasi tebal perisainya. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan nilai fluks neutron sekecil mungkin bahkan lebih kecil dari perhitungan fluks neutron pada *thermalizing column* dengan susunan perisai yang memang sudah ada saat ini.

Pada optimasi ini, tebal yang divariasikan yaitu paraffin, timbal dan grafit yang berada paling ujung pada *thermalizing column*. Sedangkan udara dan grafit yang berada paling dekat dengan teras reaktor dianggap konstan.

#### 4. Menghitung besar fluks neutron pada *thermalizing column* dengan susunan perisai yang sudah ada saat ini.

Setelah melewati reflector grafit, neutron baru memasuki kolom *thermalizing column*. Urutan perisai yang akan dilewati neutron adalah grafit, parafin, lead, udara, dan yang terakhir adalah grafit kembali. Untuk lebih jelasnya, bisa dilihat dari gambar dibawah ini :



Gambar 3.2. penampang termalizing column reactor kartini

Pehitungan besarnya fluks neutron setelah melewati berbagai perisai dapat dilihat pada lampiran E.

#### 5. Membandingkan hasil yang diperoleh apakah sudah sesuai standar.

Setelah hasil perhitungan diperoleh, maka masih perlu dipertanyakan apakah hasil perhitungan yang diperoleh sudah sesuai dengan standar dari keselamatan dan kesehatan kerja atau belum. Untuk mengetahui berapa fluks neutron minimal yang diijinkan, maka hal ini ditanyakan langsung pada Bidang Keselamatan dan Kesehatan (BK2) Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Optimasi *Shielding* Neutron

optimasi perisai dalam *thermalizing column* dilakukan dengan memvariasi tebal perisainya. Perisai yang tebalnya divariasi yaitu paraffin, timbal dan grafit yang berada paling ujung pada *thermalizing column*. Sedangkan udara dan grafit yang berada paling dekat dengan teras reaktor dianggap konstan.

Ukuran variasi tebal dilakukan berdasarkan tebal perisai yang sudah ada di Bidang Reaktor, BATAN Yogyakarta. Misalnya, balok grafit yang sudah ada tebalnya 20,3 cm, maka variasi untuk tebal grafit adalah 20,3 cm, 40,6 cm dan 60,9 cm yang merupakan kelipatan dari 20,3 cm. Sedangkan untuk paraffin dan timbal divariasi sesuai dengan sisa tebal pada *thermalizing column*.

Ruang kosong yang berisi udara tidak mendapatkan variasi dikarenakan dari hasil perhitungan didapatkan bahwa, seberapa tebal atau volume udara tidak terlalu berpengaruh terhadap pengurangan fluks neutron. Hal ini telah dijelaskan pada subbab 4.2 point 4.

Sedangkan grafit yang berada paling dekat dengan teras reaktor tidak divariasi karena pada salah satu sisi dari grafit berbentuk setengah lingkaran mengikuti kontur reaktor Kartini. Sehingga hanya paraffin, lead dan grafit yang berada paling ujung saja yang divariasi.

Setelah dilakukan variasi ketebalan terhadap perisai didapatkan hasil fluks neutron yang tersisa yang keluar melalui *thermalizing column* dijelaskan dalam tabel 4.1 :

Tabel 4.1 Besar Fluks Neutron Ketika Dilakukan Variasi Tebal Perisai Paraffin dan timbal ketika tebal grafit 60,9 cm (3 balok)

No	Tebal Grafit (cm)	Tebal paraffin (cm)	Tebal Timbal (cm)	Fluks Neutron (cacah $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
1	60,9	2,0	8,2	<b><math>6,009 \times 10^{-8}</math></b>
2	60,9	4,0	6,2	$8,342 \times 10^{-9}$
3	60,9	6,0	4,2	$1,115 \times 10^{-9}$
4	60,9	8,0	2,2	$1,492 \times 10^{-10}$
5	60,9	10,0	0,2	<b><math>1,995 \times 10^{-11}</math></b>

Variasi pertama yang dilakukan adalah grafit pada ujung *thermalizing column* terdiri atas 3 susunan balok atau tebalnya 60,9 cm, sehingga tebal yang

tersisa untuk variasi parafin dan timbal adalah 10,2 cm. Tebal parafin divariasi dari mulai 2 cm hingga 10 cm dengan kelipatan 2 cm, sedangkan timbal divariasi dari tebal yang tersisa mulai dari 8,2 cm sampai 0,2 cm dengan variasi kelipatan 2 cm.

Dari hasil Perhitungan didapatkan bahwa nilai paling baik ketika tebal parafin 10 cm dan tebal timbal 0,2 cm yaitu sebesar  $1,995 \cdot 10^{-11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . dan nilai fluks neutron yang paling banyak lolos ketika tebal parafin 2 cm dan timbal 8,2 cm yaitu sebesar  $6,009 \cdot 10^{-8}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Variasi ke dua yang dilakukan adalah grafit pada ujung *thermalizing column* terdiri atas 2 susunan balok atau tebalnya 40,6 cm, sehingga tebal yang tersisa untuk variasi parafin dan timbal adalah 30,5 cm. Tebal parafin divariasi dengan kelipatan 2,5 cm, mulai dari 2,5 cm hingga 30 cm, sedangkan timbal divariasi dari tebal yang tersisa mulai dari 28 cm sampai 0,5 cm dengan variasi kelipatan 2,5 cm.

Tabel 4.2 Besar Fluks Neutron Ketika Dilakukan Variasi Tebal Perisai Parafin dan timbal ketika tebal grafit 40,6 cm (2 balok)

No	Tebal Grafit (cm)	Tebal parafin (cm)	Tebal Timbal (cm)	Fluks Neutron (cacah $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
1	40,6	2,5	28,0	<b><math>4.716 \times 10^{-8}</math></b>
2	40,6	5,0	25,5	$3.814 \times 10^{-9}$
3	40,6	7,5	23,0	$3.08 \times 10^{-10}$
4	40,6	10	20,5	$2.494 \times 10^{-11}$
5	40,6	12,5	18,0	$2.016 \times 10^{-12}$
6	40,6	15,0	15,5	$1.631 \times 10^{-13}$
7	40,6	17,5	13,0	$1.319 \times 10^{-14}$
8	40,6	20,0	10,5	$1.066 \times 10^{-15}$
9	40,6	22,5	8,0	$8.622 \times 10^{-17}$
10	40,6	25,0	5,5	$6.972 \times 10^{-18}$
11	40,6	27,5	3,0	$5.638 \times 10^{-19}$
12	40,6	30,0	0,5	<b><math>4.559 \times 10^{-20}</math></b>

Dari tabel 4.2 dapat dilihat bahwa bahwa nilai paling baik ketika tebal parafin 30 cm dan tebal timbal 0,5 cm yaitu sebesar  $4,599 \cdot 10^{-20}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  dan nilai fluks neutron yang paling banyak lolos ketika tebal parafin 2,5 cm dan timbal 28 cm yaitu sebesar  $4,716 \cdot 10^{-8}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Variasi ke tiga yang dilakukan adalah grafit pada ujung *thermalizing column* terdiri atas 1 susunan balok atau tebalnya 20,3 cm, sehingga tebal yang tersisa untuk variasi parafin dan timbal adalah 50,8 cm. Tebal parafin divariasi dengan kelipatan 5 cm, mulai dari 50 cm hingga 5 cm, sedangkan timbal divariasi dari tebal yang tersisa mulai dari 0,8 cm sampai 45,8 cm dengan variasi kelipatan 5 cm.

Tabel 4.3 Besar Fluks Neutron Ketika Dilakukan Variasi Tebal Perisai Parafin dan timbal ketika tebal grafit 20,3 cm (1 balok)

No	Tebal Grafit (cm)	Tebal parafin (cm)	Tebal Timbal (cm)	Fluks Neutron (cacah $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
1	20,3	50,0	0,8	<b><math>1.042 \times 10^{-28}</math></b>
2	20,3	45,0	5,8	$1.593 \times 10^{-26}$
3	20,3	40,0	10,8	$2.437 \times 10^{-24}$
4	20,3	35,0	15,8	$3.727 \times 10^{-22}$
5	20,3	30,0	20,8	$5.699 \times 10^{-20}$
6	20,3	25,0	25,8	$8.716 \times 10^{-18}$
7	20,3	20,0	30,8	$1.333 \times 10^{-15}$
8	20,3	15,0	35,8	$2.039 \times 10^{-13}$
9	20,3	10,0	40,8	$3.118 \times 10^{-11}$
10	20,3	5,0	45,8	<b><math>4.768 \times 10^{-9}</math></b>

Dari tabel 4.3 dapat dilihat bahwa bahwa nilai paling baik ketika tebal parafin 50 cm dan tebal timbal 0,8 cm yaitu sebesar  $1,042 \cdot 10^{-28}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  dan nilai fluks neutron yang paling banyak lolos ketika tebal parafin 5 cm dan timbal 45,8 cm yaitu sebesar  $4,768 \cdot 10^{-9}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Dari ke tiga tabel diatas didapatkan bahwa nilai fluks neutron terkecil adalah  $1,042 \cdot 10^{-28}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  yaitu ketika tebal parafin maksimum. Dari ketiga perisai yaitu grafit, parafin dan timbal, yang mempunyai kemampuan paling baik dalam pengurangan fluks neutron adalah parafin, hal ini dikarenakan parafin merupakan hidrokarbon sehingga banyak mengandung atom H. Atom H inilah yang paling berperan dalam mengurangi fluks neutron karena ketika neutron bertumbukan dengan atom H maka seluruh tenaga neutron akan diserahkan kepada atom H.

## **Fluks Neutron Setelah Melewati Berbagai Perisai Tanpa Optimasi**

Ada beberapa jenis perisai yang dipasang dalam *thermalizing column* reaktor Kartini diantaranya grafit, parafin, lead, ruang kosong (berisi udara), boral dan aluminium. Boral dan aluminium digunakan sebagai pelapis beton bagian dalam sehingga mengantisipasi kemungkinan radiasi yang terhambur secara vertikal. Sedangkan perisai yang tersusun secara horisontal adalah grafit, parafin, lead, ruang kosong (berisi udara), grafit lagi dan pada pangkal *thermalizing column* terdapat sebuah pintu penutup yang terbuat dari lead. Pada penelitian ini dibatasi pada asumsi bahwa fluks neutron merambat secara horisontal sehingga pembahasan tentang perisai lebih difokuskan pada perisai yang tersusun secara horisontal.

### **1. Grafit**

Seperti yang telah dijelaskan dalam bab 3 bahwa sebelum memasuki *thermalizing column*, fluks neutron yang terpancar dari *lazy susan* sebesar  $4,668 \cdot 10^{11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  terlebih dahulu akan melewati reflektor grafit setebal 16,5 cm sehingga fluks neutron yang tersisa adalah  $8,009 \cdot 10^8$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Perisai yang terdapat pada ujung *thermalizing column* juga berupa grafit dengan tebal 20,3 cm. Setelah melewati perisai yang pertama ini, fluks neutron yang tersisa sebesar  $3,266 \cdot 10^5$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

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

### **2. Parafin**

Perisai kedua yang ada dalam *thermalizing column* berupa paraffin dengan tebal 8,62 cm. setelah melewati paraffin, fluks neutron berkurang menjadi 2,267 cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Pengurangan ini cukup besar disebabkan karena parafin merupakan hidrokarbon sehingga banyak mengandung atom H. Selain itu perbandingan tampang lintang penyerapan dan penyebaran yang tinggi yaitu sebesar 0,17 barn dan 11 barn menjadikannya material refleksi yang baik. Karena mengandung banyak atom H inilah sehingga parafin sangat baik sebagai perisai radiasi neutron.



### 3. Timbal

Perisai ketiga yang ada dalam *thermalizing column* adalah lead dengan tebal 1,58 cm. Fluks neutron yang tersisa setelah melewati lead sebesar 1,256 cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Saat neutron melewati perisai dari bahan lead, pengurangan fluks neutron yang terjadi sangat kecil, hal ini terjadi selain lead sangat tipis juga karena nomor atom (Z) dari lead besar yaitu 82. ketika neutron menumbuk bahan dengan nomor atom besar, maka neutron hanya akan menyerahkan tenaganya sebagian kecil saja. Sehingga mengurangi fluks neutron diperlukan tumbukan yang berulang-ulang.

### 4. Ruang kosong (berisi udara)

Susunan perisai dalam *thermalizing column* reaktor Kartini terdapat ruang kosong sepanjang 60,9 cm yang berisi udara biasa. Fluks neutron yang tersisa setelah melewati ruang kosong sebesar 1,252 cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Terlihat disini bahwa pengurangan fluks neutron sangat kecil walaupun ruang kosong ini cukup panjang sehingga lebih besar kemungkinan neutron bertumbukan dengan atom-atom penyusun udara. Hal ini terjadi karena kelimpahan hidrogen diudara sangat kecil yaitu sebesar 0,00005 % saja, sehingga ketika neutron melewati ruang kosong ini tidak terjadi banyak pengurangan fluks neutron.. Udara memang mengandung berbagai macam unsur, namun yang paling efektif untuk menghambat neutron adalah hidrogen, karena ketika bertumbukan neutron memberikan seluruh tenaganya kepada hidrogen. Kehilangan energi pada neutron dalam tumbukan elastis mencapai nilai maksimum jika inti yang ditumbuk memiliki massa yang sama dengan neutron. Oleh sebab itu neutron akan kehilangan sebagian besar energinya jika bertumbukan dengan proton (inti hidrogen). Sehingga walau hidrogen mempunyai kemampuan yang Sangat besar dalam menahan radiasi neutron karena pada setiap bertumbukan, neutron menyerahkan seluruh tenaganya kepada hidrogen. Namun karena kelimpahan hidrogen sangat kecil, maka komposisi udara biasa bukanlah merupakan perisai neutron yang baik.

### 5. Grafit

Perisai kelima dalam *thermalizing column* berupa grafit lagi dengan tebal sama 60,9 cm. karena grafit ini cukup tebal sehingga pengurangan fluks neutron

yang terjadi juga cukup banyak sehingga tersisa fluks neutron sebesar  $8,224 \cdot 10^{-11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

#### 6. Pintu penutup dari Lead

Pintu *thermalizing column* terbuat dari lead setebal 3 cm, setelah dihitung fluks neutron yang tersisa setelah melewati pintu *thermalizing column* sebesar  $2,681 \cdot 10^{-11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Setelah melewati berbagai perisai dalam *thermalizing column* fluks neutron yang tersisa adalah sebesar  $2,681 \cdot 10^{-11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Setelah ditanyakan pada Bagian Keselamatan dan Kesehatan (BK2) BATAN, besar fluks neutron yang diijinkan keluar dari sistem reaktor adalah 0. Nilai yang didapatkan dari hasil optimasi maupun tanpa optimasi adalah sebesar  $1,042 \cdot 10^{-28}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  dan  $2,681 \cdot 10^{-11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , nilai ini sangat kecil sehingga dapat dikatakan mendekati nol sehingga nilai tersebut masih diijinkan.

### **KESIMPULAN**

Dari penelitian yang sudah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

Setelah dilakukan optimasi, nilai fluks neutron paling kecil setelah melewati *thermalizing column* sebesar  $1,042 \cdot 10^{-28}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  yaitu ketika tebal paraffin 50 cm, tebal 0,8 cm dan grafit 20,3 cm.

Besar fluks neutron setelah melewati berbagai perisai dalam *thermalizing column* yang ada di reaktor Kartini adalah  $2,681 \cdot 10^{-11}$  cacah  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Kedua nilai fluks neutron diatas sudah masuk dalam standar kesehatan dan keselamatan kerja terhadap radiasi neutron karena nilai tersebut hampir mendekati nol.

### **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] Akhadi, M. 1997. *Dasar-dasar Proteksi Radiasi*. Rineka cipta: Jakarta.
- [2] Akhadi, M. 2003. *Pengantar Teknologi Nuklir*. Rineka cipta: Jakarta.
- [3] Atmojo, M. 1997. *Penahan Radiasi Neutron Komposit Berbasis Karet Alam Boron Karbida*. Pusat Penelitian Nuklir-BATAN: Yogyakarta.
- [4] Buntaro, T. 1980. *Metode Pengukuran Zarah Radiasi dan Detektor Nuklir, bagian I*. PPGM-BATAN: Yogyakarta.
- [5] Edward, E. 1997. *Eksperimental Reactor Physics*. John Willey and sons: New York, London, Sidney, Toronto.

- [6] Rahmawati,E.2003.*Pemetakan Fluks Neutron Thermal Pada Fasilitas Iradiasi Lazy Susan Reaktor Kartini*.Skripsi.FMIPA-UNY:Yogyakarta.
- [7] Jaeger,dkk.1968.*Engineering Compedium On Radiation Shielding Volume I Shielding Fundamental And Methods*.International Atomic Energi Agency Vienna:Briger-Verlag,Berlin,Heiderberg,Newyork.
- [8] Jaeger,dkk.1968.*Engineering Compedium On Radiation Shielding Volume II Shielding Material*.International Atomic Energi Agency Vienna:Spinger-Verlag,Berlin,Heidelberg,Newyork.
- [9] Prayoto.1978.*Pengantar Teori Reaktor*.Teknik Nuklir UGM:Yogyakarta.
- [10] Suhaemi,T.1982.*Perisai Radiasi*.Pusan Penelitian Bahan Murni Dan Instrumen,Badan Tenaga Nuklir Nasional:Yogyakarta.
- [11] Sutondo,T.2002.*Ciri Desain Reaktor TRIGA*.Pualitbang Teknologi Maju,Batan Tenaga Nuklir Nasional:Yogyakarta.
- [12] Syarip.2002.*Dasar Teori Reaktor*.Puslitbang Teknologi Maju,Badan Tenaga Nuklir Nasional:Yogyakarta.
- [13] Tjiptono,T.2007.*Pelatihan Operator Dan Supervisor Reaktor Kartini*.Pusat Teknologi Akselerator Dan Proses Bahan,BATAN:Yogyakarta.
- [14] Wardhana,A.2007.*Teknologi Nuklir:Proteksi Radiasi dan Aplikasinya*.Andi Offset:Yogyakarta.
- [15] Widarto,dkk.2006.*Analisis Karakterisasi Atenuasi Grafit,Parafin Dan Boral Untuk Bahan Perisai Radiasi Neutron Thermal*.Prosiding Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir BATAN:Yogyakarta.