

PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN FLUKS DAN SPEKTRUM NEUTRON DI FASILITAS SISTIM *RABBIT* REAKTOR RSG-GAS

Amir Hamzah¹⁾, Anis Rohanda¹⁾, Jaka Iman²⁾

¹⁾Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN

²⁾Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN

ABSTRAK

PENGUKURAN DAN PERHITUNGAN FLUKS DAN SPEKTRUM NEUTRON DI FASILITAS SISTIM *RABBIT* REAKTOR RSG-GAS. Spektrum neutron pada suatu reaktor nuklir merupakan salah satu parameter penting dan menjadi karakteristik dari reaktor tersebut. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan spektrum neutron di posisi fasilitas iradiasi RS-1, RS-2, RS-4 dan RSPN teras reaktor RSG-GAS menggunakan paket program MCNP sebagai salah satu paket program yang handal dan sangat luas dipergunakan berbasis teori *Monte Carlo*. Analisis spektrum neutron tersebut dilakukan sebanyak 50 kelompok energi dengan menerapkan opsi *tally* fluks mode F5. Karena hasil keluaran dari MCNP masih berupa nilai fluks ternormalisasi, maka digunakan fluks neutron rerata teras sebesar $1,05 \times 10^{14}$ n/cm²/detik hasil keluaran program ORIGEN2.1 sebagai faktor konversi untuk mendapatkan nilai fluks neutron absolut. Hasil perhitungan spektrum neutron di fasilitas iradiasi sistem *rabbit* tersebut terlihat terjadi peningkatan fluks neutron secara gradual mulai dari posisi RS-1 hingga RS-4 dan sedikit penurunan di RSPN terutama pada daerah energi yang lebih tinggi. Hasil integral fluks neutron termal dan epitermal rerata di RS-1 hingga RSPN adalah $1,2 \times 10^{13}$ dan $2,7 \times 10^{12}$ n/cm²/detik. Nilai fluks neutron termal di posisi sistem *rabbit* tersebut cukup tinggi dan mengambil bagian sebanyak 82% dari fluks total.

Kata kunci: reaktor RSG-GAS, fasilitas sistem *rabbit*, MCNP, spektrum neutron

ABSTRACT

MEASUREMENT AND CALCULATION OF NEUTRON FLUX AND SPECTRUM IN RABBIT SYSTEM FACILITY OF RSG-GAS REACTOR. Neutron spectrum in a nuclear reactor is one of the important parameters and a characteristic of the reactor. In this research, neutron spectra calculations in the position of the irradiation facility of RS-1, RS-2, RS-4 and RSPN RSG-GAS reactor core has been performed using MCNP program package as one package of programs, that is reliable and very widely used based on Monte Carlo theory. The neutron spectrum analysis is performed by 50 energy groups by applying flux tally option of F5 mode. Because the output of MCNP is still a normalized flux values, an average core neutron flux of 1.05×10^{14} n/cm²/sec from the ORIGEN2.1 program is used as a conversion factor to get the absolute value of the neutron flux. The results of calculation of the neutrons spectrum in the rabbit systems irradiation facility show an increase in the neutron flux, starting gradually from the RS-1 position to RS-4 and a slight decrease in RSPN especially in areas with higher energy. The results of integral average thermal and epithermal neutron flux in RS-1 to RSPN are 1.2×10^{13} and 2.7×10^{12} n/cm²/sec. Those thermal neutron fluxes at the position of the rabbit system are quite high and take part as much as 82% of the total flux.

Keywords: RSG-GAS reactor, rabbit system facility, MCNP, neutron spectrum

PENDAHULUAN

Sehubungan dengan masa operasi reaktor RSG-GAS telah mencapai 30 tahun, maka diperkirakan reaktor tersebut telah mengalami penuaan dan dikawatirkan telah terjadi beberapa kerusakan pada beberapa komponen. Dari sekian banyak parameter kerusakan komponen, salah satunya adalah perusakan radiasi^[1-5]. Material teras reaktor yang terkena paparan radiasi neutron yang cukup besar dengan energi yang cukup tinggi secara terus-menerus dapat mengalami perusakan. Salah satu proses perusakan radiasi pada material teras reaktor terjadi karena adanya tumbukan neutron dengan energi di atas 1 MeV sehingga terpentalnya inti atom dari posisi kisinya sehingga terbentuk kekosongan (vakansi) dan atom yang terpental tersebut menyisip di antara kisi-kisi atom sehingga terbentuk intertisi. Akumulasi vakansi dan intertisi tersebut pada titik tertentu akan menimbulkan kerusakan material diantaranya berupa retakan pada material tersebut. Besaran vakansi-intertisi bergantung pada besarnya fluens neutron yang berenergi lebih tinggi dari 1 MeV. Seperti diketahui, besaran fluens neutron merupakan hasil perkalian fluks neutron terhadap waktu selama proses paparan radiasi neutron tersebut terjadi. Maka pada penelitian ini akan dilakukan evaluasi fluks dan spektrum neutron teras RSG-GAS agar dapat ditentukan besaran fluens neutron sehingga dapat diperkirakan tingkat perusakan radiasi pada material teras reaktor.

Pada penelitian ini dilakukan analisis fluks dan spektrum neutron menggunakan paket program MCNP. Perhitungan fluks dan spek-

trum neutron di posisi fasilitas iradiasi RS-1, RS-2 dan RS-4 teras RSG-GAS dilakukan berdasarkan model yang telah dibuat. Analisis spektrum neutron tersebut dilakukan sebanyak 50 kelompok energi neutron dengan menerapkan opsi *tally* fluks mode F5. Mode kcode 100.000 *histori* sebanyak 1000 iterasi dilakukan untuk mendapatkan *error* statistik yang cukup baik. Hasil keluaran dari MCNP masih berupa nilai fluks ternormalisasi, maka diperlukan suatu nilai sebagai faktor konversi untuk mendapatkan nilai fluks neutron absolut. Besaran faktor konversi tersebut diperoleh dari perhitungan fluks neutron teras dari hasil keluaran perhitungan simulasi operasi reaktor menggunakan program ORIGEN2.1^[6]. Pengukuran fluks neutron di posisi fasilitas iradiasi RS-1, RS-2 dan RS-4 teras RSG-GAS dilakukan menggunakan metoda aktivasi keping^[7-13]. Dengan diperolehnya hasil pengukuran dan perhitungan fluks neutron maka akan dapat ditentukan fluens neutron di posisi-posisi iradiasi tersebut dan perkiraan fluens neutron di posisi lain yang dikehendaki sehingga dapat diperkirakan tingkat perusakan yang terjadi pada komponen-komponen teras reaktor RSG-GAS yang pada gilirannya dapat diperkirakan sisa umurnya.

TEORI

Pengukuran fluks neutron menggunakan metoda aktivasi keping merupakan suatu metoda yang sangat handal, mempunyai akurasi yang tinggi dan relatif murah. Dengan metoda ini, keping yang terbuka dan

terbungkus kadmium diiradiasi di posisi tertentu di dalam reaktor. Keping-keping yang telah diiradiasi tersebut selanjutnya diukur aktivitasnya menggunakan sistim spektrometer gamma yang telah dikalibrasi. Hasil pencacahan keping tersebut berupa luas puncak gamma (Np) pada energi gamma yang diamati dalam satuan cacah atau Bq. Aktivitas saturasi per gram keping (A) hasil pencacahan dengan koreksi waktu peluruhan dan waktu pencacahan dihitung dengan persamaan berikut ^[14]:

$$A = \frac{N_p}{t_c \cdot m \cdot p \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot D \cdot C \cdot S} \dots\dots\dots (1)$$

dengan :

t_c = lama pencacahan, detik,

m = massa keping, gram,

p = kandungan isotop target di dalam keping,

γ = persen gamma untuk puncak gamma yang diukur,

ε = efisiensi detektor untuk energi gamma yang diukur,

$D = e^{-\lambda \cdot t_d}$ = faktor koreksi peluruhan aktivitas keping,

$C = \frac{(1 - e^{-\lambda \cdot t_c})}{\lambda \cdot t_c}$ = faktor koreksi selama pencacahan/pengukuran aktivitas keping,

$S = (1 - e^{-\lambda \cdot t_i})$ = faktor saturasi selama proses iradiasi keping,

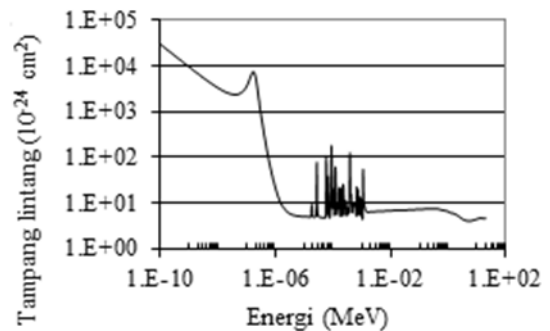
$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ = konstanta peluruhan, $T_{1/2}$ = waktu paro isotop keping, detik⁻¹,

t_d = lama peluruhan, mulai dari akhir iradiasi hingga pencacahan/pengukuran,

t_i = lama iradiasi keping, detik. .

Pembungkus kadmium (Cd) digunakan untuk

menghalangi neutron termal untuk mengaktivasi keping yang berada di dalamnya. Pada Gambar 1 terlihat bahwa tampang lintang Cd tersebut sangat besar untuk neutron yang berenergi di bawah 0,5 eV. Energi 0,5 eV ini dikenal sebagai energi potong kadmium (Cd cut-off) yang berarti bahwa hampir semua neutron di bawah 0,5 eV terserap habis oleh pembungkus Cd dan melewati hampir semua neutron yang berenergi di atas 0,5 eV untuk mengaktivasi keping yang berada di dalamnya. Aktivitas keping yang terbuka diberi notasi A_{bare} dan aktivitas keping terbungkus Cd diberi notasi A_{cd} , maka parameter nisbah Cd adalah $R_{cd} = A_{bare}/A_{cd}$ dan faktor koreksi Cd adalah $F_{cd} = (R_{cd} - 1)/R_{cd}$.



Gambar 1. Grafik tampang lintang reaksi (n, γ) cadmium ^[15]

Berdasarkan aktivitas keping terbuka dan terbungkus Cd tersebut maka fluks neutron termal dan epitermal ditentukan dengan persamaan berikut ^[14]:

$$\phi_{th} = \frac{A_{th} \cdot M}{N_0 \cdot \sigma_{th}} = \frac{A_{bare} \cdot F_{cd} \cdot M}{N_0 \cdot \sigma_{th}} \dots\dots\dots (2)$$

dan

$$\phi_{epi} = \frac{A_{cd} \cdot M}{N_0 \cdot I_r} = \frac{M \cdot A_{bare} / R_{cd}}{N_0 \cdot I_r} \dots\dots\dots (3)$$

dengan :

$A_{th} = A_{bare} - A_{cd} =$ aktivitas keping hasil reaksi hanya dengan neutron termal, Bq/det./gr,

$M =$ berat atom keping,

$N_o =$ bilangan Avogadro,

$\sigma_{th} =$ tampang lintang termal keping, $1/\text{cm}^2$,

$I_r =$ integral resonansi yaitu tampang lintang pada daerah energi epitermal, $1/\text{cm}^2$

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap yaitu :

1. Perhitungan komposisi teras reaktor RSG-GAS dan penyiapan bahan untuk pengukuran fluks neutron.

Perhitungan komposisi elemen bakar dan elemen kendali berdasarkan pada bahan bakar tipe pelat uranium silisida, kerapatan $2,96 \text{ g/cm}^3$, serta pengayaan 19,75 %. Perhitungan komposisi dilakukan untuk perangkat yang dibuat secara homogen dengan perangkat lunak Ms. Office EXCEL. Bahan keping emas dibungkus Al dan Cd dan dimasukkan ke dalam kapsul. Dibuat 3 buah kapsul dengan isi keping yang hampir sama. Masing-masing kapsul diiradiasi di fasilitas iradiasi pada tanggal 13 Maret 2015.

2. Pemodelan teras dan fasilitas iradiasi reaktor RSG-GAS dan pencacahan keping.

Pemodelan teras RSG-GAS berdasarkan komposisi semua komponen dan geometri teras dilakukan menggunakan

program VisEd ^[16]. Proses iradiasi keping dilakukan di fasilitas iradiasi RS-1, RS-2 dan RS-4 teras RSG-GAS dan pencacahan bahan yang telah diiradiasi tersebut dilakukan dengan sistem spektrometri gamma yang telah dikalibrasi.

3. Analisis data pencacahan keping yang telah diiradiasi dan penentuan fluks neutron.

Analisis data pencacahan keping terbuka (dibungkus aluminium) dan dibungkus cadmium yang telah diiradiasi. Seperti diketahui, aluminium memiliki tampang lintang yang kecil terhadap neutron, maka pemakaian pembungkus aluminium tidak banyak mengganggu neutron yang datang dan bereaksi dengan keping emas. Sedangkan penggunaan pembungkus cadmium adalah untuk menangkap neutron termal hingga energi 0,5 eV, sehingga hanya neutron di atas 0,5 eV (epitermal) yang bereaksi dengan keping emas. Aktivitas per gram keping hasil pencacahan telah dikoreksi waktu peluruhan dan waktu pencacahan. Berdasarkan aktivitas keping tersebut dilakukan penentuan fluks neutron termal dan epitermal di posisi iradiasi keping tersebut. Perhitungan fluks neutron menggunakan program MCNP ^[16-19]. Perhitungan fluks neutron menggunakan program MCNP menghasilkan fluks neutron ternormalisasi, maka diperlukan faktor multipli-

kasi sehingga diperoleh fluks neutron absolut. Faktor multiplikasi tersebut diperoleh dari hasil perhitungan pembakaran bahan bakar menggunakan program ORIGEN2.1^[6]. Hasil perhitungan fluks neutron tersebut dibandingkan dengan hasil pengukuran sehingga dapat dilihat tingkat akurasi data hasil perhitungan fluks neutron.

4. Analisis spektrum neutron di fasilitas iradiasi sistem *rabbit*.

Perhitungan fluks dan spektrum neutron di posisi fasilitas iradiasi RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN teras RSG-GAS menggunakan paket program MCNP. Analisis spektrum neutron tersebut dilakukan sebanyak 50 kelompok energi neutron dengan menerapkan opsi tally fluks mode F5. Mode kcode 100000 histori sebanyak 1000 iterasi untuk mendapatkan error statistik yang cukup baik. Kriteria kesuksesan hasil analisis program MCNP diantaranya adalah kesalahan relatif (re) $< 0,05$, variance of the variance (vov) $< 0,1$ dan figure of merit (fom): tetap. Hasil keluaran dari MCNP masih berupa nilai fluks ternormalisasi, maka diperlukan suatu nilai sebagai faktor konversi untuk mendapatkan nilai fluks neutron absolut. Besaran faktor konversi tersebut diperoleh dari perhitungan fluks neutron teras dari hasil keluaran perhitungan simulasi operasi reaktor dengan daya 15 MW selama 55 hari menggunakan program ORIGEN2.1. Hasil analisis fluks neutron rerata teras

RSG-GAS menggunakan program ORIGEN2.1 adalah sebesar $1,05 \times 10^{14}$ n/cm²/detik yang selanjutnya digunakan sebagai faktor konversi fluks neutron hasil keluaran program MCNP.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi elemen bakar RSG-GAS

Hasil perhitungan komposisi elemen bakar, elemen kendali, posisi batang kendali tanpa dan dengan adanya penyerap neutron, elemen dummy dan elemen pemantul berilium ditunjukkan dalam Tabel 1 dalam satuan persen berat. Komposisi semua material yang terdapat di dalam elemen bakar teras yang dibuat homogen dengan geometri balok berukuran panjang 8,1 cm, lebar 7,71 cm dan tinggi 60 cm. Kerena tiga pelat pada tiap sisi elemen kendali dihilangkan untuk penyisipan batang kendali, maka elemen kendali berukuran panjang 5,775 cm, lebar 7,71 cm dan tinggi 60 cm. Posisi batang kendali diletakkan di sisi kiri dan kanannya masing-masing berukuran panjang 1,1625 cm, lebar 7,71 cm dan tinggi 60 cm. Dengan demikian batang kendali berbentuk garpu. Di dalam kolom MCNP ID sudah menggunakan pustakan tampang lintang terbaru yang diolah berdasarkan pustaka tampang lintang ENDF/B-VII.1^[15].

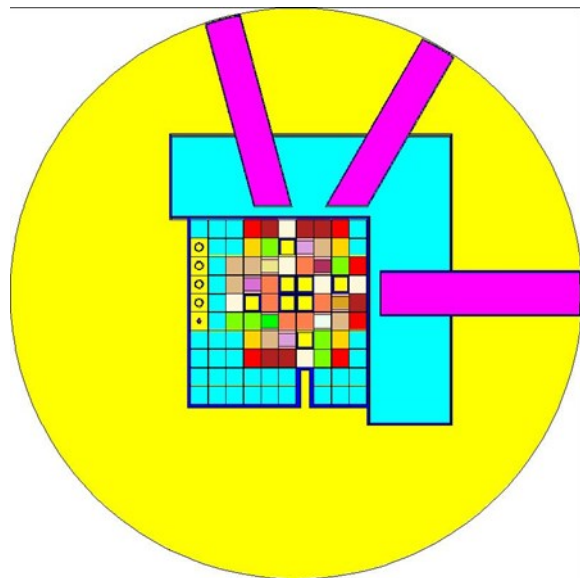
Komposisi hampir semua unsur di dalam EK sedikit lebih besar dibandingkan dengan di EB kecuali oksigen dan hydrogen dan demikian pula densitasnya. Hal itu dikarenakan EK hanya memperhitungkan 15 buah pelat elemen bakar di bagian tengah tanpa memperhitungkan adanya air pendingin.

Tabel 1. Komposisi EB, EK, dummy dan elemen berilium RSG-GAS

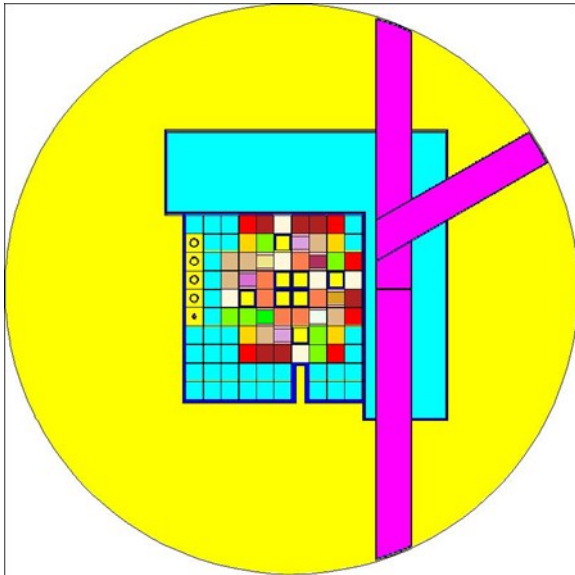
JNSUR	MCNP ID.	EB	EK	Pos.BK -Abs	Pos.BK +Abs	DUMMY	Berilium
U35	92235.80c	0,034433	0,034451	-	-	-	-
U38	92238.80c	0,139913	0,139984	-	-	-	-
Si	14000.66c	0,015816	0,015832	0,002797	0,003311	0,000521	-
Al	13027.80c	0,483583	0,484503	0,511648	0,175224	0,167120	-
Mg	12000.62c	0,006573	0,006583	0,009008	0,003085	0,003558	-
Cu	29000.50c	0,000940	0,000945	0,001342	0,000460	0,000087	-
Mn	25055.80c	0,001615	0,001621	0,002259	0,005479	0,000521	-
Fe	26000.55c	0,001656	0,001660	0,002295	0,167885	0,000694	-
Cr	24000.50c	0,000983	0,000985	0,001349	0,042813	0,000521	-
Zn	30000.70c	0,000770	0,000772	0,001065	0,000365	0,000347	-
Ti	22000.62c	0,000385	0,000386	0,000532	0,001123	0,000174	-
O	8016.80c	0,278270	0,277334	0,415367	0,068931	0,733977	0,025155
H	1001.80c	0,035063	0,034945	0,052337	0,008685	0,092483	0,003170
Ag	47000.55c	-	-	-	0,398196	-	-
In	49000.66c	-	-	-	0,074662	-	-
Cd	48000.51c	-	-	-	0,024887	-	-
Ni	28000.50c	-	-	-	0,024705	-	-
C	6000.80c	-	-	-	0,000188	-	-
Be	4009.80c	-	-	-	-	-	0,971675
DENSITAS (g/cm3)		1,937629	1,940232	1,499907	4,379681	1,120193	1,806340

Pemodelan teras dan fasilitas iradiasi reaktor RSG-GAS dan pencacahan keping

Pemodelan teras dilakukan menggunakan program VisEd berdasarkan data-data komposisi semua komponen teras beserta ukuran geometri masing-masing. Konfigurasi bahan bakar teras RSG-GAS berupa matriks 10 x 10 dengan blok reflektor berilium pada dua sisinya. Hasil pemodelan teras RSG-GAS dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3. Titik tengah teras pada $z=0$ cm, maka Gambar 1 dan 2 masing-masing menunjukkan model pada ketinggian -10 cm dan $=10$ cm. Warna menunjukkan jenis bahan, kuning adalah air, merah muda untuk udara, biru muda untuk berilium dan biru tua untuk aluminium serta warna lain untuk elemen bakar dan elemen kendali dengan berbagai tingkat fraksi bakarnya.



Gambar 2. Model teras RSG-GAS pada $z=-10$ cm



Gambar 3. Model teras RSG-GAS pada $z=+10\text{cm}$

Hasil pencacahan keping emas pada 3 tiga buah kapsul yang dibungkus Al dan Cd yang diiradiasi selama 5 menit pada daya reaktor 15 MWth pada 13 Maret 2014 ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan data hasil pencacahan keping tersebut nantinya akan ditentukan aktivitas keping pada saat diiradiasi dan selanjutnya dapat ditentukan besarnya fluks neutron di posisi RS-1, RS-2 dan RS4 tersebut.

Tabel 2. Hasil pencacahan keping yang telah diiradiasi di RS-1, RS-2 dan RS-4

Pembungkus		Waktu pencacahan	Energi	Luas puncak	Uncert.	Cts/sec.	%err
Posisi iradiasi:		RS-1					
Al	-	3/16/2015 11:25	411,99	1,18E+06	1149,92	2,50E+03	0,1
-	Cd	3/16/2015 11:38	412,00	3,16E+05	583,37	7,00E+02	0,1
Al	-	3/16/2015 11:50	412,02	1,12E+06	1118,93	2,40E+03	0,1
Posisi iradiasi:		RS-2					
Al	-	3/16/2015 14:17	411,95	1,26E+06	1192,26	2,70E+03	0,1
-	Cd	3/16/2015 13:40	412,02	4,00E+05	658,38	8,80E+02	0,1
Al	-	3/16/2015 14:04	411,92	1,20E+06	1164,43	2,60E+03	0,1
Posisi iradiasi:		RS-4					
Al	-	3/16/2015 14:42	411,97	4,25E+05	680,21	2,80E+03	0,1
-	Cd	3/16/2015 13:52	411,92	4,58E+03	315,29	9,30E+02	0,1
Al	-	3/16/2015 14:29	411,98	1,26E+06	1186,51	2,70E+03	0,1

Analisis data pencacahan keping yang telah diiradiasi dan penentuan fluks neutron

Hasil analisis data pencacahan keping terbuka dan terbungkus cadmium yang telah diiradiasi di fasilitas iradiasi RS-1, RS-2 dan RS-4 teras RSG-GAS berupa aktivitas per gram keping. Fluks neutron termal dan epitermal dapat ditentukan berdasarkan aktivitas keping tersebut. Perhitungan fluks neutron di posisi fasilitas iradiasi RS-1, RS-2 dan RS-4 menggunakan program MCNP. Aktivitas per gram keping baik yang terbuka (dibungkus

aluminium) maupun yang dibungkus cadmium pada akhir iradiasi dan hasil penentuan fluks

neutron serta hasil perhitungan fluks neutron termal dan epitermal fasilitas iradiasi ditabulasikan pada Tabel 3. Tingkat kesalahan hasil pengukuran fluks neutron termal dan epitermal kurang dari 10%. Sedangkan tingkat kesalahan hasil perhitungan fluks neutron termal dan epitermal menggunakan program MCNP kurang dari 3%.

Tabel 3. Fluks neutron termal dan epitermal hasil pengukuran dan perhitungan

Posisi	A_{bare}/g	A_{Cd}/g	R_{cd}	F_{cd}	Hasil pengukuran		Hasil perhitungan MCNP	
					Fluks termal	Fluks epitermal	Fluks termal	Fluks epitermal
RS-1	$1,64 \times 10^{10}$	$4,40 \times 10^{09}$	3,73	0,732	$4,41 \times 10^{13}$	$1,26 \times 10^{13}$	$5,75 \times 10^{13}$	$1,08 \times 10^{13}$
RS-2	$1,92 \times 10^{10}$	$5,73 \times 10^{09}$	3,35	0,702	$4,95 \times 10^{13}$	$1,64 \times 10^{13}$	$6,29 \times 10^{13}$	$1,48 \times 10^{13}$
RS-4	$1,98 \times 10^{10}$	$6,08 \times 10^{09}$	3,26	0,693	$5,05 \times 10^{13}$	$1,74 \times 10^{13}$	$6,78 \times 10^{13}$	$1,71 \times 10^{13}$

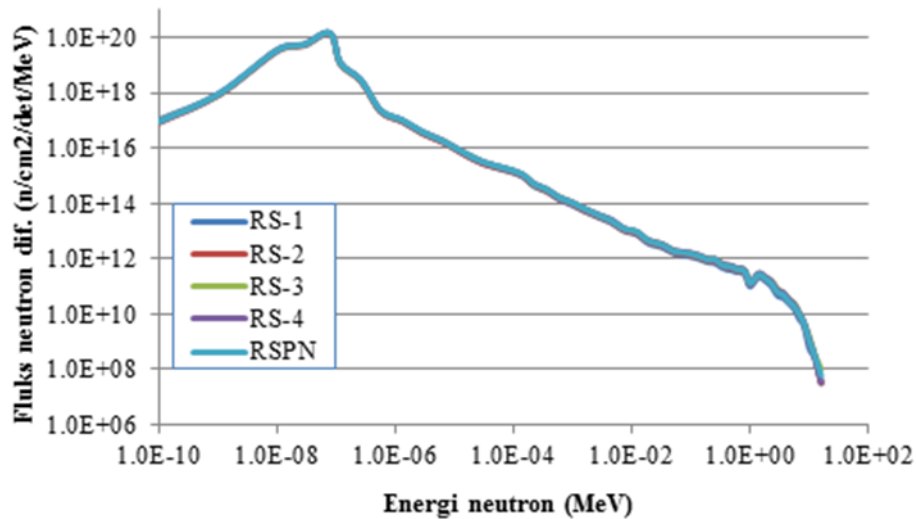
Pada Tabel 3 tersebut terlihat bahwa, adanya peningkatan nilai fluks neutron termal dan epitermal dari posisi RS-1 hingga RS-4 baik hasil pengukuran maupun perhitungan. Hal itu dapat difahami karena dari posisi RS-1 hingga RS-4 mengarah ke tengah teras reaktor (Gambar 2 dan 3). Pada Tabel 3 tersebut terlihat juga bahwa, fluks neutron termal hasil perhitungan menggunakan MCNP lebih tinggi sekitar 30% dibandingkan dengan hasil pengukuran. Sedangkan fluks neutron epitermal hasil perhitungan menggunakan MCNP lebih rendah sekitar 30% dibandingkan dengan hasil pengukuran. Perbedaan ini kemungkinan besar disebabkan oleh belum diterapkannya koreksi perisai diri ^[20-22] pada pengukuran fluks neutron. Penerapan faktor koreksi tersebut masih membutuhkan analisis yang cukup mendalam dan akan dikerjakan pada penelitian berikutnya.

Analisis spektrum neutron di fasilitas iradiasi sistem *rabbit*

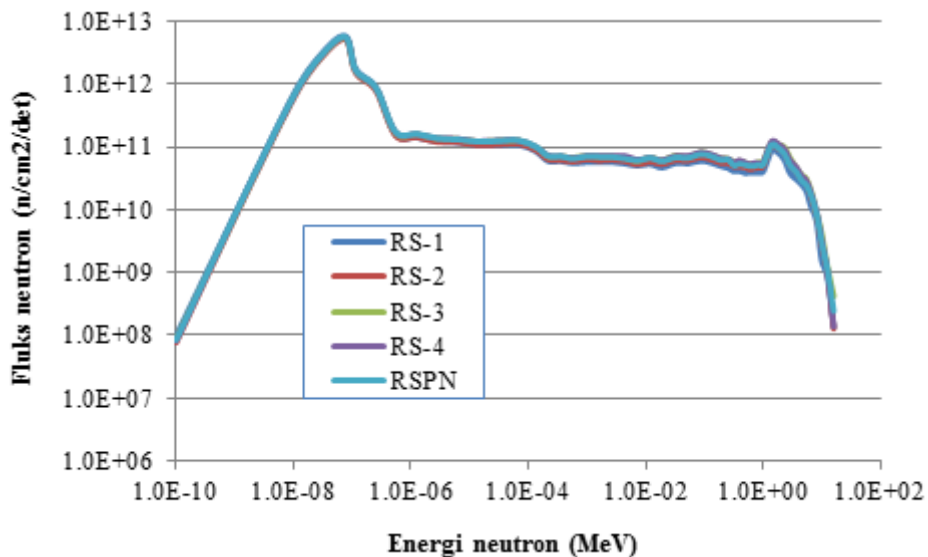
Hasil analisis spektrum diferensial neutron dan spektrum fluks neutron di fasilitas iradiasi sistem *rabbit* RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN teras RSG-GAS menggunakan paket program MCNP masing-masing diplot pada Gambar 4 dan 5. Letak posisi iradiasi RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN beserta konfigurasi teras reaktor RSG-GAS dapat dilihat pada

Gambar 2 dan 3 di atas. Fasilitas iradiasi RS-1 hingga RS-4 memiliki bentuk yang identik dan RSPN adalah fasilitas iradiasi sistem *rabbit* pneumatik yang lebih kecil dari fasilitas RS.

Pada Gambar 4 dan 5 dapat dilihat bahwa bentuk dan besaran spektrum neutron pada semua fasilitas iradiasi RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN tidak banyak berubah. Hal itu dikarenakan oleh posisi semua fasilitas sistem *rabbit* berada pada posisi yang tidak berjauhan dan berada pada satu baris di pinggir teras reaktor. Namun bila diteliti lebih jauh, pada Gambar 5, lebih tampak terjadi peningkatan fluks neutron mulai dari posisi RS-1 hingga RSPN terutama pada daerah energi yang lebih tinggi. Lebih jelasnya, hasil perhitungan fluks neutron sebagai hasil integral spektrum neutron termal di posisi RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN masing-masing sebesar $1,22 \times 10^{13}$, $1,09 \times 10^{13}$, $1,15 \times 10^{13}$, $1,17 \times 10^{13}$. dan $1,19 \times 10^{13}$ n/cm²/detik. Sedangkan hasil perhitungan fluks neutron sebagai hasil integral spektrum neutron epitermal di posisi RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN masing-masing sebesar $2,33 \times 10^{12}$, $2,58 \times 10^{12}$, $2,97 \times 10^{12}$, $2,97 \times 10^{12}$, $2,82 \times 10^{12}$ n/cm²/detik. Dengan demikian terlihat terjadi peningkatan fluks neutron secara gradual mulai dari posisi RS-1 hingga RS-4 dan sedikit



Gambar 4. Spektrum diferensial neutron di fasilitas iradiasi sistem *rabbit* RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN teras RSG-GAS.



Gambar 5. Spektrum fluks neutron di fasilitas iradiasi sistem *rabbit* RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN teras RSG-GAS.

KESIMPULAN

Pengukuran dan perhitungan fluks neutron di fasilitas iradiasi sistem *rabbit* reaktor RSG-GAS telah dilakukan pada penelitian ini. Pengukuran fluks neutron dilakukan menggunakan metoda aktivasi keping sedangkan perhitungan dilakukan menggunakan program MCNP. Fluks neutron termal hasil perhitungan lebih tinggi sekitar 30% dibandingkan dengan hasil pengukuran.

Sedangkan fluks neutron epitermal hasil perhitungan lebih rendah sekitar 30% dibandingkan dengan hasil pengukuran. Hasil perhitungan spektrum neutron di posisi fasilitas iradiasi RS-1, RS-2, RS-3, RS-4 dan RSPN teras RSG-GAS menggunakan paket program MCNP menunjukkan peningkatan fluks neutron secara gradual mulai dari posisi RS-1 hingga RS-4 dan sedikit penurunan di RSPN terutama pada daerah energi yang lebih

tinggi. Hasil integral fluks neutron termal dan epitermal rerata di RS-1 hingga RSPN adalah $1,2 \times 10^{13}$ dan $2,7 \times 10^{12}$ n/cm²/detik. Fluks neutron termal di posisi sistem *rabbit* tersebut cukup tinggi dan mengambil bagian 82% dari fluks total. Dengan demikian fasilitas iradiasi sistem *rabbit* reaktor RSG-GAS ini cukup ideal untuk penelitian/kegiatan yang memanfaatkan neutron termal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh DIPA PTKRN untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PTKRN BATAN atas alokasi dana untuk penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dr. Jupiter Sitorus Pane, M.Sc. selaku Kepala Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor (BFTR) – PTKRN BATAN atas saran dan perbaikan, sehingga makalah ini dapat ditulis dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. JOSEPH HASHEM, ERICH SCHNEIDER, MITCH PRYOR AND SHELDON LANDSBERGER, "Theoretical neutron damage calculations in industrial robotic manipulators used for non-destructive imaging applications", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 94, pp. 71-79, 2017.
2. A. AL MAZOUZIA, A. ALAMO, D. LIDBURY, D. MOINEREAU, S. VAN DYCK, "PERFORM 60: Prediction of the effects of radiation for reactor pressure vessel and in-core materials using multi-scale modelling – 60 years foreseen plant lifetime", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 241, pp. 3403–3415, 2011.
3. THOMAS H. COURTNEY, "Mechanical Behavior of Materials", Mc. Graw-Hills Publishing Company, New York, 1990.
4. MEHTAP GUNAY, "Investigation of radiation damage in structural material of APEX reactor by using Monte Carlo method", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 53, pp. 59–63, 2013.
5. MEHTAP GUNAY, BASAR SARER, HIZIR KASAP, "The effect on radiation damage of structural material in a hybrid system by using a Monte Carlo radiation transport code", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 63, pp. 157–161, 2014.
6. MEIYIN ZHENG et al, "Development of a MCNP–ORIGEN burn-up calculation code system and its accuracy assessment", *Annals of Nuclear Energy*; Vol. 63, pp. 491–498, 2014.
7. HALUK YUCEL, IBRAHIM COBANBAS AND ASUMAN KOLBASI, "Measurement of Photo-Neutron Dose from an 18-MV Medical Linac Using a Foil Activation Method in View of Radiation Protection of Patients", *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 48, pp. 525-532, 2016.
8. J.H. CHAO, A.C. CHIANG, "Activation detection using indium foils for simultaneous monitoring neutron and photon intensities in a reactor core", *Radiation Measurements*, vol.

- 45, pp. 1024-1033, 2010.
9. A. WOJCIECHOWSKI et al, "A method of measuring the neutron energy spectrum by activation detectors", *Measurement*, vol. 90, pp. 118-126, 2016.
 10. A. BORIO DI TIGLIOLE et al, "TRIGA reactor absolute neutron flux measurement using activated isotopes", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 70, pp. 249-255, 2014.
 11. STEFAN MERZ et al, "Neutron flux measurements at the TRIGA reactor in Vienna for the prediction of the activation of the biological shield", *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 69, pp. 1621-1624, 2011.
 12. S. TAMAKI et al, "Mock-up experiment at Birmingham University for BNCT project of Osaka University – Neutron flux measurement with gold foil", *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 106, pp. 72-74, 2015.
 13. Y. MUSA et al, "Determination of radial and axial neutron flux distribution in irradiation channel of NIRR-1 using foil activation technique", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 50, pp. 50–55, 2012.
 14. IAEA, "Neutron Fluence Measurement", *Technical Report Series No. 107*, 1970.
 15. M.B. CHADWICK et al, "ENDF/B-VII: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology", *Nuclear Data Sheets*, 102, 293, 2006.
 16. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, "MCNP6.1/MCNP5/MCNPX; Monte Carlo N–Particle Transport Code System Including MCNP6.1, MCNP5-1.6, MCNPX-2.7 and Data Libraries", Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 2013.
 17. SALAHEDDIN R. MALKAWI, BASAM KHUWAILEH, MALIK AL-MOMANI, "Prediction of neutron energy spectrum in a typical MTR type research reactor using Monte Carlo simulations", *Annals of Nuclear Energy*, Vol.56, pp.17-22, 2013.
 18. K. KHATTAB, I. SULIEMAN, "Calculation and comparison of the neutron energy flux spectra in the Syrian MNSR irradiation sites using the MCNP-4C code", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 52, pp. 307–314, 2010.
 19. SARAH W.M., JEFFREY C. KINGA, CHAD L. POPE, "Beam characterization at the Neutron Radiography Reactor", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 265, pp. 639–653, 2013.
 20. C. CHILIAN, R. CHAMBON, G. KENNEDY, "Neutron self-shielding with k0-NAA irradiations", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 622, pp. 429-432, 2010.
 21. M.N. NASRABADI, M. JALALI, A. MOHAMMADI, "Calculation of thermal neutron self-shielding correction factors for aqueous bulk sample prompt gamma neutron activation analysis

- using the MCNP code”, *Materials and Atoms*, Vol. 263, pp. 473-476, 2007.
22. ANDREJ TRKOV et al, “Self-shielding factor calculations of heterogeneous samples in activation measurements for neutron spectrum unfolding”, *Nuclear Engineering and Design*, vol.246, pp. 69– 74, 2012.