

PENENTUAN POSISI IRADIASI BATU TOPAZ DENGAN KAPSUL DAN PENGARAH BORON KARBIDA (B₄C) PADA GRID BERILIUM REAKTOR RSG-GAS MENGGUNAKAN PROGRAM BATAN 2-DIFF

Fitri Susanti, Nuradam Effendy

Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran, BRIN

Email: fitrisusanti725@gmail.com

Diterima: 25 Juli 2022, diperbaiki: 3 Oktober 2022, disetujui: 10 Oktober 2022

ABSTRAK

Secara rutin iradiasi pewarnaan batu topaz di reaktor RSG-GAS dilakukan pada fasilitas irradiation position (IP). Adanya permintaan target iradiasi lain pada fasilitas yang sama, menyebabkan perlu adanya pengembangan fasilitas iradiasi baru yang dapat digunakan sebagai pengganti fasilitas iradiasi batu topaz. Hal ini dilakukan pada grid berilium yang digunakan sebagai reflektor reaktor. Pengembangan teknik iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C menjadi solusi karena sifat B₄C sebagai penyerap neutron yang baik. Keuntungan dari pengembangan posisi iradiasi pada berilium yang jauh dari daerah bahan bakar menurunkan risiko gangguan distribusi fluks neutron di teras reaktor akibat penggunaan material B₄C. Selain itu, penggunaan material B₄C akan menurunkan interaksi neutron termal dan memperbesar interaksi neutron cepat dalam pewarnaan batu topaz. Penentuan posisi grid berilium yang baik digunakan dalam iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C perlu dilakukan untuk menjamin keselamatan operasi reaktor RSG-GAS. Perhitungan parameter neutronik menggunakan program komputer code BATAN-2DIFF (2 dimensi) dan WIMSD5 untuk generasi tampang lintang. Hasil perhitungan menunjukkan iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C dapat dilakukan pada grid berilium yang jauh dengan bahan bakar supaya tidak mengganggu nilai reaktivitas teras reaktor. Perubahan reaktivitas terkecil antara kapsul tanpa sekat dan dengan sekat dihasilkan oleh grid berilium H-1 untuk 1 posisi sebesar 0,0485% $\Delta k/k$ dan 0,0431% $\Delta k/k$. Pada variasi 2 posisi iradiasi, dihasilkan oleh kombinasi grid A-2 dan J-2 dengan nilai 0,2993% $\Delta k/k$ dan 0,2774% $\Delta k/k$. Sedangkan pada variasi 3 posisi, dihasilkan oleh kombinasi grid A-2, J-2 dan H-2 dengan nilai 0,4138% $\Delta k/k$ baik pada kapsul tanpa sekat maupun dengan sekat. Jika melihat dari sisi perubahan fluks neutron cepat yang lebih besar dan efisiensi waktu yang baik selama 189 jam, maka iradiasi batu topaz dengan kapsul B₄C direkomendasikan dilakukan pada grid berilium A-2.

Kata kunci: batu topaz, boron karbida, berilium, BATAN-2DIFF, reaktor RSG-GAS.

ABSTRACT

Routinely, topaz coloring irradiation in the RSG-GAS reactor is carried out at the irradiation position (IP) facility. The large number of requests for other irradiation targets at the same facility, has led to the need for the development of new irradiation facilities that can be used as replacement for topaz irradiation facilities. This is possible on beryllium grids that used as reflectors in reactor. The development of topaz irradiation techniques with B₄C capsules and guide tube is a solution due to the nature of B₄C as a good neutron absorber. The advantage of developing an irradiation position on beryllium far from the fuel area lowers the risk of impaired distribution of neutron flux in the reactor core due to the use of B₄C material. In addition, the use

of B_4C material will lower the interaction of thermal neutrons with topaz and increase the interaction of fast neutrons in the coloring of topaz. Good positioning of the beryllium grid used in irradiation of topaz with B_4C capsule and guide tube needs to be carried out to achieve RSG-GAS reactor operation safety. Neutronic parameter calculation using computer code programs BATAN-2DIFF (2-dimensional) and WIMSD5 for target cell generation. The calculation results show that topaz irradiation with B_4C capsule and guide tube can be carried out on beryllium grid that far from fuel so as not to interfere the reactivity value of the reactor core. The smallest change in reactivity between capsules without screen and with screen was produced by the beryllium grid H-1 for 1 position by 0.0485% $\Delta k/k$ and 0.0431% $\Delta k/k$. In the variation of 2 irradiation positions, it was produced by a combination of A-2 and J-2 grids with values of 0.2993% $\Delta k/k$ and 0.2774% $\Delta k/k$. While in the 3-position variation, it is produced by a combination of A-2, J-2 and H-2 grids with a value of 0.4138% $\Delta k / k$ both on capsules without screen and with screen. In terms of a greater change in fast neutron flux and time efficiency for 189 hours, irradiation of topaz with B_4C capsules is recommended to be carried out on the beryllium A-2 grid.

Keywords: topaz, boron carbide, beryllium, BATAN-2DIFF, RSG-GAS reactor.

PENDAHULUAN

Iradiasi pewarnaan batu topaz $Al_2SiO_4(OH_4F)_2$ dengan neutron merupakan utilisasi rutin yang dilaksanakan di Reaktor Serba Guna G. A. Siwabessy (RSG-GAS). Pewarnaan ini bertujuan untuk meningkatkan nilai properti batu topaz seperti perubahan warna tertentu yang akan berpengaruh terhadap permintaan pasar dan nilai ekonomisnya [1]. Secara umum iradiasi batu topaz menghasilkan warna biru muda yang biasa disebut *London Blue Topaz* dan warna biru tua yang disebut *Swiss Blue Topaz*. Perbedaan warna batu topaz dihasilkan berdasarkan lamanya waktu iradiasi dalam reaktor [2]. Iradiasi batu topaz di reaktor RSG-GAS dilakukan pada fasilitas iradiasi di dalam teras reaktor (*in core*) maupun di luar teras reaktor (*out core*). Iradiasi di dalam teras dilakukan pada fasilitas *Irradiation Position* (IP) dan fasilitas *Neutron Transmutation Doping* (NTD) untuk fasilitas iradiasi di luar teras. Waktu yang dibutuhkan untuk iradiasi batu topaz pada fasilitas *in core* yaitu selama 10 jam sedangkan *out core* membutuhkan waktu 8 hari [3,4]. Adanya permintaan iradiasi target lain seperti $AlMg_3$ pada fasilitas IP

dan pengembangan fasilitas *silicon doping* pada fasilitas NTD, mengharuskan pengembangan posisi iradiasi lain untuk menggantikan posisi iradiasi batu topaz sebelumnya. Beberapa pertimbangan perlu diperhatikan agar posisi iradiasi baru dapat menghasilkan pewarnaan batu topaz sesuai dengan kebutuhan pengguna dan tetap memenuhi standar keselamatan dalam pengoperasian reaktor RSG-GAS.

Pengembangan posisi iradiasi baru dimungkinkan untuk dilakukan pada posisi berilium karena berada di dalam grid teras reaktor [5]. Berilium digunakan sebagai reflektor reaktor RSG-GAS. Secara desain terdapat dua jenis berilium sebagai reflektor yaitu berilium elemen/blok (BE) dan berilium dengan sumbat/*beryllium with stopper* (BS) [6]. Kajian awal pada analisis keselamatan terhadap penggunaan grid berilium sebagai fasilitas iradiasi batu topaz perlu dilakukan, diantaranya posisi iradiasi tidak berdekatan dengan daerah tabung pengarah berkas neutron (*beam tube*), bahan bakar maupun fasilitas *silicon doping*, karena dikhawatirkan dapat mengganggu distribusi fluks neutron yang dimanfaatkan pada daerah tersebut. Sehingga hal ini dapat menyebabkan pengoperasian

reaktor menjadi kurang optimal.

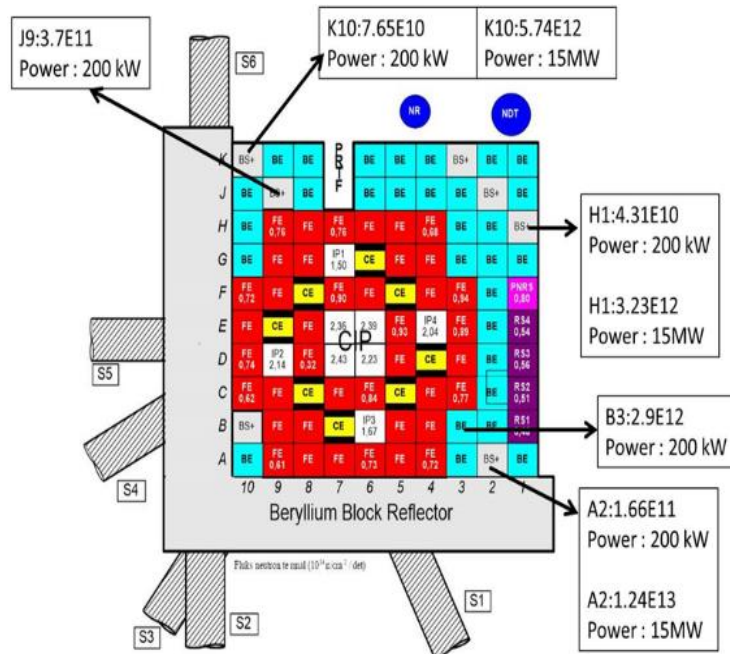
Penentuan fasilitas iradiasi baru dalam pewarnaan batu topaz *in core* juga harus mempertimbangkan teknik iradiasi dan faktor keselamatan operasi reaktor. Secara teknis, pewarnaan batu topaz *in core* sebelumnya dilakukan dengan kapsul dan pengarah berbahan aluminium yang diiradiasi pada posisi IP. Iradiasi batu topaz yang dilakukan pada posisi IP akan memiliki perbedaan distribusi fluks neutron jika dibandingkan dengan posisi berilium. Daerah IP akan memiliki distribusi fluks neutron yang lebih tinggi dibandingkan pada daerah berilium. Hal ini dikarenakan daerah berilium yang jauh dari posisi bahan bakar. Pada reaktor penelitian seperti RSG-GAS, fluks neutron termal lebih mendominasi dibanding fluks epitermal dan fluks cepat. Interaksi iradiasi neutron pada pewarnaan batu topaz di reaktor dilakukan dengan fluks neutron cepat. Sedangkan interaksi fluks neutron termal dengan batu topaz akan meningkatkan aktivitas atom pengotor waktu paruh panjang seperti Ta¹⁸¹, Sc⁴⁵, Fe⁵⁴ dan Cs¹³³ [7]. Oleh karena itu perlu dikembangkan metode baru untuk iradiasi batu topaz dengan kualitas yang sama akan tetapi dapat meminimalisir aktivitas atom pengotor waktu paruh panjang akibat interaksi dengan fluks neutron termal. Metode pengembangan yang dilakukan yaitu melakukan iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah boron karbida (B₄C). Tujuan penggunaan B₄C yaitu untuk menyerap fluks neutron termal sehingga target dapat berinteraksi penuh dengan fluks neutron cepat dalam pewarnaan batu topaz [8]. Dengan demikian, aktivitas pengotor waktu paruh panjang akibat interaksi target dengan fluks neutron termal dapat diminimalisir dan pendinginan batu topaz pasca iradiasi menjadi lebih cepat dari metode sebelumnya.

Analisis keselamatan parameter neutronik pengembangan fasilitas iradiasi batu topaz baru di posisi grid berilium dengan kapsul dan pengarah B₄C perlu dilakukan untuk memastikan target tidak memberikan dampak berarti pada pengoperasian reaktor RSG-GAS. Parameter neutronik dihitung dengan paket program Batan-2DIFF dan WIMSD5 yang telah tervalidasi [9,10,11]. Perhitungan sel target dilakukan menggunakan paket program WIMSD5 dengan data nuklir ENDF/B-VII dalam 4 kelompok tenaga neutron [12]. Batasan parameter neutronik yang dihitung dalam makalah ini meliputi, perubahan reaktivitas ($\Delta\rho$), perubahan faktor puncak daya radial maksimum ($\Delta FPDR_{max}$), perbandingan fluks neutron termal dan cepat (ϕ_t/ϕ_f), serta nilai perubahan fluks neutron sebelum dan setelah iradiasi batu topaz dengan kapsul B₄C [13]. Massa target topaz per kapsul sebesar 1,5 kg, hal ini berdasarkan penelitian sebelumnya [14]. Hasil perhitungan diharapkan dapat memberikan rekomendasi posisi berilium yang dapat digunakan sebagai fasilitas iradiasi baru target batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C.

METODOLOGI

Penentuan Posisi Berilium

Sebagai penyerap neutron yang kuat, iradiasi topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C dimungkinkan untuk dilakukan pada posisi berilium. Berilium digunakan sebagai reflektor di teras RSG-GAS. Konfigurasi teras dan distribusi fluks neutron pada grid berilium reaktor RSG-GAS secara pengukuran ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi teras reaktor RSG-GAS dengan fluk neutron hasil pengukuran pada grid berilium

Penentuan posisi berilium yang akan digunakan sebagai fasilitas iradiasi baru untuk iradiasi target topaz dengan kapsul dan pengaruh B₄C diprioritaskan memiliki kriteria sebagai berikut:

a. Posisi tidak berada pada daerah yang terdapat banyak *beam tube* dan fasilitas PRTF karena dapat mengganggu stabilitas fluk neutron pada daerah tersebut;

- b. Posisi iradiasi jauh dari fasilitas *silicon doping* (NTD) sehingga tidak mengganggu iradiasi *wafer silicon doping* pada daerah tersebut;
- c. Terdapat 3 variasi posisi yang masuk dalam kriteria untuk iradiasi topaz dengan kapsul dan pengaruh B₄C di berilium dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Posisi kandidat iradiasi topaz di berilium teras reaktor RSG-GAS

Variasi Posisi	Posisi Kandidat
1 Posisi	A-2
	B-2
	B-3
	H-1

2 Posisi	H-2
	J-2
	A-2 dan B-2 A-2 dan H-2 A-2 dan J-2
3 Posisi	A-2, B-2 dan J-2 (jika tidak ada target silikon doping)

A-2, B-2 dan H-2 (jika ada target silikon doping)

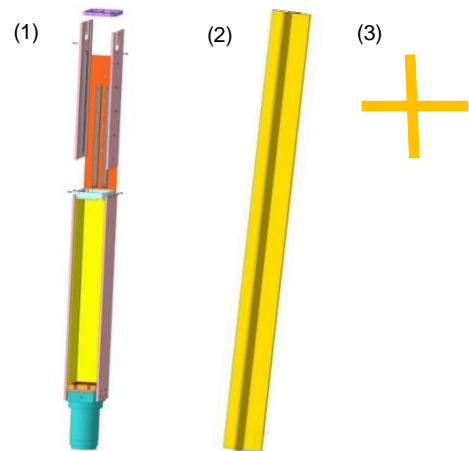
Perhitungan Sel Target

Perhitungan sel target batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C dilakukan dengan paket program WIMSD5B untuk menggenerasi konstanta kelompok dalam 4 kelompok tenaga neutron dengan data nuklir ENDF/B-VII^[12]. Perhitungan sel dilakukan menggunakan kapsul B₄C dengan sekat dan tanpa sekat. Massa batu topaz seberat 1,5 kg diasumsikan menempati ruang kapsul setinggi 45 cm. Susunan target batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C disajikan di Tabel 2.

Tabel 2. Data susunan target batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C

Ketinggian (cm)	Material Penyusun (dari luar ke dalam)
45	Air (H ₂ O)
	Aluminium (Al)
	Boron Karbida (B ₄ C)
	Topaz
15	Air (H ₂ O)
	Aluminium (Al)
	Boron Karbida (B ₄ C)

Sel target topaz dimodelkan dalam 2 bagian yaitu kapsul dengan sekat dan kapsul tanpa sekat. Pada kondisi kapsul tanpa sekat sel target dimodelkan dalam 1 ruang, sedangkan pada kapsul dengan sekat dibagi menjadi 4 ruang. Model sel ini digambarkan sesuai Gambar 2.



- (1) Bagian kapsul B₄C tanpa sekat
- (2) Sekat B₄C dengan 4 ruang
- (3) Bentuk sekat B₄C dilihat dari sisi atas

Gambar 2. Model sel kapsul dan pengarah topaz B₄C

Pemodelan kapsul dan pengarah topaz B₄C telah disesuaikan dengan dimensi grid dan berilium elemen di teras reaktor RSG-GAS. Selanjutnya dilakukan perhitungan teras dengan program BATAN-2DIFF (2-Dimensi) pada seluruh bagian target yang dihomogenisasi dalam 1 sel sesuai dengan fraksi volume dari masing-masing material penyusun sel yang ditunjukkan dalam Tabel 3. Perhitungan sel dilakukan untuk generasi konstanta kelompok difusi pada target batu topaz dengan pengarah dan kapsul B₄C, baik dengan sekat maupun tanpa sekat. Kapsul topaz pada fasilitas baru, dirancang berbentuk persegi panjang dengan ketebalan sekat B₄C pada masing-masing sisi kapsul setebal 2 mm.

Tabel 3. Fraksi volume material target topaz untuk tiap model

Material	Fraksi Volume 1,5 kg Batu Topaz	
	Tanpa Sekat	Dengan Sekat
H ₂ O	0,37235	0,35410
Al	0,03199	0,03199

B ₄ C	0,09505	0,14065
Topaz	0,50061	0,47325

Perhitungan sel target dilakukan dengan program WIMSD5 untuk generasi komposisi material penyusun target topaz, kapsul dan pengarah B₄C. Perhitungan teras dilakukan menggunakan paket program BATAN-2DIFF sehingga teras penuh reaktor RSG-GAS dan target batu topaz dalam kapsul dan pengarah B₄C dimodelkan dalam model geometri X-Y (2-Dimensi). Parameter teras yang dihitung adalah perubahan reaktivitas akibat masuknya target ($\Delta\rho$), perubahan faktor puncak daya radial maksimum ($\Delta\text{FPDR}_{\text{max}}$), perbandingan fluks neutron termal dan cepat (ϕ_t/ϕ_f), serta nilai perubahan fluks neutron sebelum dan setelah iradiasi batu topaz dengan kapsul B₄C. Batasan keselamatan parameter neutronik teras reaktor RSG-GAS mempersyaratkan nilai maksimum reaktivitas untuk target dan FPDR masing-masing adalah $\leq 0,5\%$ $\Delta k/k$ dan $\leq 1,4$ [6]. Target iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C di posisi berilium yang ditentukan akan ditolak, jika nilai batasan keselamatan operasi reaktor tersebut terlampaui.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perubahan reaktivitas ($\Delta\rho$) dan faktor puncak daya radial maksimum (FPDR_{max}) pada iradiasi batu topaz pada posisi berilium di reaktor RSG-GAS dengan program BATAN-2DIFF ditunjukkan pada Tabel 4. Hasil pada Tabel 4 menunjukkan perhitungan iradiasi target dengan 1 posisi dilakukan pada grid berilium A-2, B-2, B-3, H-1, H-2, dan J-2. Perubahan reaktivitas terbesar terjadi pada grid B-3 sebesar 0,9606% $\Delta k/k$ pada kapsul B₄C tanpa sekat dan 0,9532% $\Delta k/k$ pada kapsul B₄C dengan sekat. Secara konfigurasi grid B-3 berdekatan secara langsung dengan

bahan bakar yang berada pada grid B-4 dan C-3. Hal ini menunjukkan bahwa iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C pada daerah yang berdekatan dengan bahan bakar akan meningkatkan nilai gangguan reaktivitas. Pengaruh B₄C sebagai penyerap neutron kuat menjadikan perubahan reaktivitas yang signifikan pada daerah tersebut.

Simulasi iradiasi dengan variasi 2 posisi dilakukan pada grid A-2 dan H-2, A-2 dan B-2, serta A-2 dan J-2. Posisi ini dipilih sebagai alternatif fasilitas iradiasi yang tidak berdekatan langsung dengan bahan bakar. Perubahan nilai reaktivitas terbesar variasi 2 posisi terdapat pada kombinasi grid A-2 dan B-2 dengan nilai 0,4728% $\Delta k/k$ pada kapsul tanpa sekat dan 0,4532% $\Delta k/k$ pada kapsul dengan sekat. Perhitungan iradiasi batu topaz pada 2 posisi menunjukkan perbedaan nilai reaktivitas yang tidak terlalu besar, antara kapsul B₄C tanpa sekat maupun dengan sekat. Efektifitas iradiasi yang baik pada daerah ini ditunjukkan dengan nilai perubahan reaktivitas yang lebih kecil dibanding pada daerah yang berdekatan langsung dengan bahan bakar. Iradiasi batu topaz dengan 3 posisi menunjukkan perubahan nilai reaktivitas yang tidak jauh berbeda dengan iradiasi pada 2 posisi jika dilakukan pada grid yang jauh dari bahan bakar. Akan tetapi nilai perubahan reaktivitas meningkat jika salah satu posisi iradiasi pada 3 variasi posisi tersebut berdekatan dengan bahan bakar. Perubahan nilai reaktivitas variasi 3 posisi grid terbesar terdapat pada kombinasi grid A-2, B-3 dan H-1 dengan nilai 1,0478% $\Delta k/k$ pada kapsul tanpa sekat dan 1,0326% $\Delta k/k$ pada kapsul dengan sekat. Selisih nilai perubahan reaktivitas terbesar antara kapsul tanpa sekat dan dengan sekat pada variasi grid 1, 2 atau 3 posisi masing-masing sebesar 0,0075%; 0,0196% dan 0,0152% $\Delta k/k$.

Tabel 4. Perubahan reaktivitas pada iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengaruh B₄C

POSISI GRID	TANPA SEKAT				DENGAN SEKAT			
	ρ (%)	% Δk/k	FPDR max	ΔFPDR max	ρ (%)	% Δk/k	FPDR max	ΔFPDR max
Tanpa Target	9,7666	0,0000	1,2191	0,0000	9,7666	0,0000	1,2191	0,0000
A-2	9,5643	-0,2023	1,2343	0,0152	9,5785	-0,1881	1,2333	0,0142
B-2	9,3563	-0,4103	1,2548	0,0357	9,3704	-0,3963	1,2537	0,0346
B-3	8,8060	-0,9606	1,3441	0,1250	8,8134	-0,9532	1,3428	0,1237
H-1	9,7181	-0,0485	1,2260	0,0069	9,7235	-0,0431	1,2252	0,0061
H-2	9,5629	-0,2037	1,2510	0,0319	9,5764	-0,1903	1,2487	0,0296
J-2	9,6793	-0,0873	1,2321	0,0130	9,6864	-0,0802	1,2309	0,0118
A-2 dan H-2	9,3478	-0,4189	1,2681	0,0490	9,3759	-0,3907	1,2647	0,0456
A-2 dan B-2	9,2938	-0,4728	1,2582	0,0391	9,3134	-0,4532	1,2568	0,0377
A-2 dan J-2	9,4673	-0,2993	1,2492	0,0301	9,4892	-0,2774	1,2470	0,0279
A-2, B-3 dan H-1	8,7188	-1,0478	1,3564	0,1373	8,7340	-1,0326	1,3540	0,1349
A-2, B-2 dan H-2	9,0775	-0,6892	1,2943	0,0752	9,1110	-0,6556	1,2904	0,0713
A-2, J-2 dan H-2	9,3529	-0,4138	1,2686	0,0495	9,3529	-0,4138	1,2686	0,0495

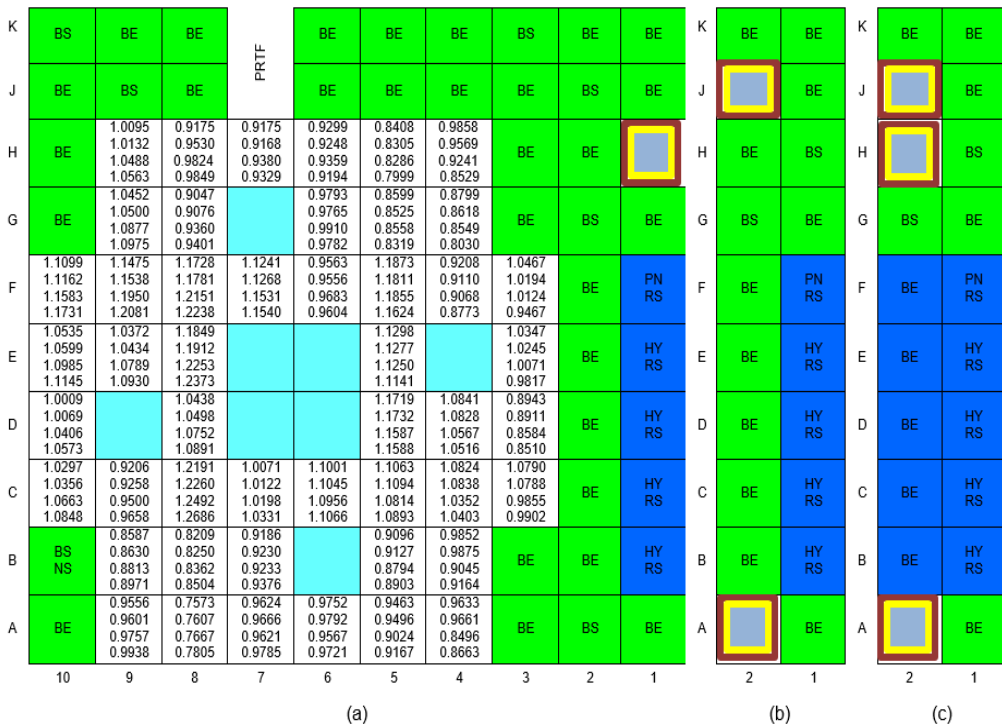
Hasil perhitungan pada Tabel 4 juga memperlihatkan perubahan nilai reaktivitas pada kapsul B₄C dengan sekat lebih kecil dibandingkan tanpa sekat. Hal ini menunjukkan semakin banyak B₄C yang digunakan sebanding dengan besarnya serapan fluks neutron yang berinteraksi dalam iradiasi batu topaz. Nilai perubahan reaktivitas terkecil memiliki pola yang sama, baik pada kapsul topaz B₄C tanpa sekat maupun dengan sekat. Nilai perubahan reaktivitas terkecil pada iradiasi batu topaz di berilium untuk 1 posisi diperoleh pada grid H-1 sebesar 0,0485% Δk/k pada kapsul tanpa sekat dan 0,0431% Δk/k pada kapsul dengan sekat. Secara teknis posisi ini dinilai ideal untuk iradiasi topaz dengan kapsul B₄C karena jauh dari fasilitas *beam tube*, *silicon doping* maupun posisi bahan bakar. Pada variasi 2 posisi iradiasi, nilai perubahan reaktivitas terkecil dihasilkan oleh kombinasi grid A-2 dan J-2 dengan nilai 0,2993% Δk/k pada kapsul tanpa

sekat dan 0,2774% Δk/k pada kapsul dengan sekat. Sedangkan pada variasi 3 posisi, nilai perubahan reaktivitas terkecil dihasilkan oleh kombinasi grid A-2, J-2 dan H-2 dengan nilai 0,4138% Δk/k baik pada kapsul tanpa sekat maupun dengan sekat. Kedua variasi posisi ini dinilai baik secara teknis karena berada pada posisi yang saling berseberangan sehingga berpengaruh terhadap keseimbangan distribusi fluks neutron. Selisih nilai perubahan reaktivitas terkecil antara kapsul tanpa sekat dan dengan sekat baik pada variasi grid 1 dan 2 posisi, masing-masing sebesar 0,0054%; 0,0219% Δk/k. Sedangkan pada variasi grid 3 posisi menunjukkan nilai yang sama. Keseluruhan nilai perubahan reaktivitas pada variasi ini, masih dibawah nilai batas yang ditentukan untuk pengoperasian reaktor RSG-GAS sebesar 0,5% Δk/k.

Nilai ΔFPDR_{max} pada Tabel 4 menunjukkan perubahan faktor puncak daya radial (FPDR) maksimal akibat

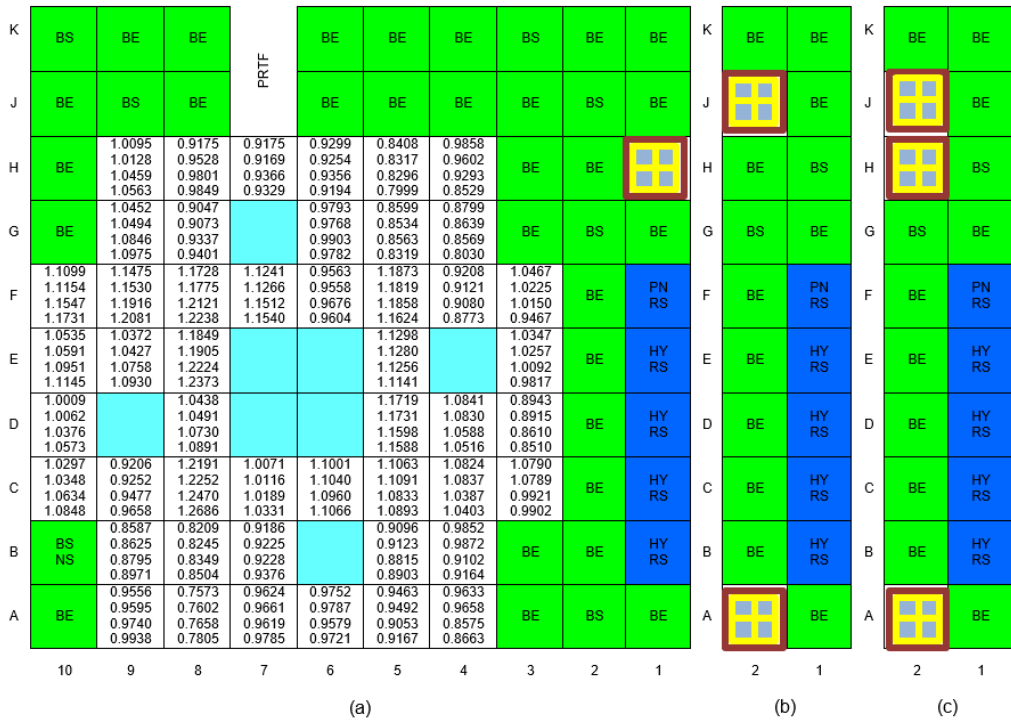
masuknya target di teras reaktor. Nilai Δ FPDRmax pada kapsul B₄C dengan sekat lebih kecil dibandingkan tanpa sekat. Hal ini menunjukkan pola yang sama dengan perubahan nilai reaktivitas. Perubahan nilai FPDRmax untuk setiap elemen bakar di teras reaktor RSG-GAS akibat iradiasi target topaz dengan kapsul B₄C tanpa sekat dan dengan sekat ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4. Gambaran distribusi FPDRmax dipilih pada posisi grid dengan nilai perubahan reaktivitas terkecil. Distribusi FPDRmax

pada 1 posisi digambarkan oleh grid H-1, sedangkan pada variasi 2 dan 3 posisi digambarkan oleh kombinasi grid A-2 dan J-2 serta kombinasi grid A-2, J-2 dan H-2. Berdasarkan gambar dapat dilihat pada seluruh variasi posisi kapsul tanpa sekat maupun dengan sekat, nilai Δ FPDR tertinggi dihasilkan pada grid C-8. Hal ini dimungkinkan terjadi karena posisi grid C-8 merupakan elemen bakar kendali baru yang menempati kelas 1, sesuai pola *refueling* bahan bakar reaktor RSG-GAS.



Keterangan nilai FPDR pada tiap baris dalam kolom:
 (1) Tanpa target (2) Grid H-1 sesuai gambar (a) (3) Grid A-2 dan J-2 sesuai gambar (b) (4) Grid A-2, J-2, H-2 sesuai gambar (c)

Gambar 3. Distribusi FPDR iradiasi target topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C tanpa sekat



Keterangan nilai FPDR pada tiap baris dalam kolom:
 (1) Tanpa target (3) Grid A-2 dan J-2 sesuai gambar (b)
 (2) Grid H-1 sesuai gambar (a) (4) Grid A-2, J-2, H-2 sesuai gambar (c)

Gambar 4. Distribusi FPDR iradiasi target topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C dengan sekat

Gambar 3 dan 4 menunjukkan pola distribusi nilai FPDR_{max} pada daerah bahan bakar mengalami perubahan akibat penyisipan target iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C, baik tanpa sekat maupun dengan sekat. Iradiasi topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C menyebabkan penurunan nilai FPDR_{max} pada daerah yang berdekatan dengan target, sedangkan pada sisi yang jauh dari target mengalami kenaikan nilai FPDR_{max}. Hal ini menunjukkan daerah bahan bakar yang jauh dari posisi target mengkompensasi distribusi fluks neutron pada daerah bahan bakar yang dekat dengan target karena B₄C merupakan menyerap neutron yang kuat. Penurunan nilai FPDR_{max} akan

semakin tinggi sebanding dengan banyaknya variasi posisi grid yang digunakan dalam iradiasi batu topaz, baik pada kapsul B₄C tanpa sekat maupun dengan sekat. Nilai FPDR_{max} terendah yang dihasilkan dari insersi target batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C tanpa sekat dan dengan sekat untuk 1 posisi grid pada H-1 sebesar 1,2260 dan 1,2252. Sedangkan pada variasi 2 posisi grid pada A-2 dan J-2 sebesar 1,2492 dan 1,2470. Serta pada variasi 3 posisi grid A-2, J-2 dan H-2 masing-masing diperoleh nilai yang sama sebesar 1,2686. Secara keseluruhan nilai batasan FPDR_{max} ini masih berada dalam batas ketentuan yang dipersyaratkan dalam

pengoperasian reaktor RSG-GAS yaitu sebesar 1,4.

Perbandingan fluk neutron cepat dan termal akibat penggunaan kapsul dan pengarah B₄C meningkat karena sifat B₄C sebagai penyerap neutron yang kuat ditunjukkan pada Tabel 5. Pada kondisi tanpa adanya target iradiasi topaz, perbandingan fluk neutron cepat dan termal pada grid berilium elemen (BE) lebih tinggi dibandingkan berilium dengan sumbat (BS). Hal ini terjadi

karena komposisi material berilium yang lebih banyak pada berilium elemen. Sedangkan pada penyisipan iradiasi topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C, baik tanpa sekat maupun dengan sekat pada grid tersebut menghasilkan pola yang kurang konsisten. Terutama pada grid yang berdekatan langsung dengan bahan bakar seperti grid B-3, menghasilkan nilai perbandingan fluk neutron cepat dan termal yang melonjak tajam.

Tabel 5. Nilai perbandingan fluks neutron termal dan cepat pada iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C

POSISI GRID	TANPA TARGET (ϕ_t/ϕ_f)	DENGAN TARGET (ϕ_t/ϕ_f)	
		TANPA SEKAT	DENGAN SEKAT
A-2 (BS)	1,2493	50,5634	41,3605
B-2 (BE)	1,6607	60,4524	21,8619
B-3 (BE)	1,6607	27,6957	191,2000
H-1 (BS)	1,2493	25,8039	43,6897
H-2 (BE)	1,6607	23,9794	86,6923
J-2 (BS)	1,2493	34,6552	58,6061

Tabel 5 memperlihatkan perbandingan fluk neutron cepat dan termal meningkat dengan penambahan material B₄C baik pada kapsul topaz tanpa sekat maupun dengan sekat. Dengan demikian dapat dilihat pengaruh penyisipan kapsul dan pengarah B₄C menjadi penyerap kuat terhadap fluk neutron cepat dan termal. Sehingga penggunaan kapsul dan pengarah B₄C dalam iradiasi batu topaz pada grid berilium perlu dipertimbangkan terutama jika dilakukan bersamaan dengan iradisi target pada fasilitas lainnya di teras reaktor.

Fluk neutron cepat dan termal pada grid berilium sebelum dan setelah iradiasi topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C berubah secara signifikan, ditampilkan pada Tabel 6. Berdasarkan perhitungan, kapsul dan pengarah B₄C mampu mereduksi fluks neutron hingga lebih dari 90%. Dengan demikian, hal ini perlu menjadi pertimbangan untuk memastikan bahwa besarnya fluk neutron yang dibutuhkan untuk iradiasi batu topaz pada grid berilium mampu memberikan efek pewarnaan batu topaz sesuai dengan kebutuhan.

Tabel 6. Nilai fluks neutron cepat dan termal sebelum dan setelah iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C

POSISI GRID	FLUK (E+14)	SEBELUM IRADIASI (ϕ E+14)	SETELAH IRADIASI			
			TANPA SEKAT (ϕ E+14)	% Δ	DENGAN SEKAT (ϕ E+14)	% Δ
A-2 (BS)	Φ_t	1,7869	0,3590	79,91	0,6080	65,97
	Φ_f	1,4303	0,0071	99,50	0,0147	98,97
B-2 (BE)	Φ_t	2,6475	0,5078	80,82	0,9182	65,32
	Φ_f	1,5942	0,0084	99,47	0,0420	97,37
B-3 (BE)	Φ_t	2,6475	1,3017	50,83	0,8604	67,50
	Φ_f	1,5942	0,0470	97,05	0,0045	99,72
H-1 (BS)	Φ_t	1,7869	0,1316	92,64	0,1267	92,91
	Φ_f	1,4303	0,0051	99,64	0,0029	99,80
H-2 (BE)	Φ_t	2,6475	0,5827	77,99	0,3381	87,23
	Φ_f	1,5942	0,0243	98,48	0,0039	99,76
J-2 (BS)	Φ_t	1,7869	0,2010	88,75	0,1934	89,18
	Φ_f	1,4303	0,0058	99,59	0,0033	99,77

Efek penyerapan neutron termal pada grid berilium B-3 pada kapsul tanpa sekat menghasilkan perubahan terkecil sebesar 50,83%. Hal ini terjadi akibat grid B-3 berdekatan secara langsung dengan bahan bakar pada grid B-4 dan C-3, menjadikan fluks neutron lebih besar di daerah tersebut. Namun penyerapan neutron yang tinggi hingga 50% ini akan mengakibatkan gangguan reaktivitas teras yang tinggi pula, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

Sebagai reaktor riset, fluks neutron termal di teras reaktor RSG-GAS lebih dominan dibandingkan fluks neutron cepat. Penyerapan fluks neutron cepat akibat kapsul dan pengarah B₄C mencapai nilai yang rata, baik pada kapsul tanpa sekat maupun dengan sekat sebesar lebih dari 97%. Dengan demikian, besarnya fluks neutron yang mampu memberikan efek pewarnaan terhadap iradiasi topaz di grid berilium dengan kapsul dan pengarah B₄C di reaktor RSG-GAS perlu dipertimbangkan kembali.

Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan oleh Y. Khatchenko dkk, menyatakan bahwa, kondisi iradiasi

optimal untuk produksi pewarnaan topaz dibutuhkan neutron cepat sekitar 10^{18}cm^{-2} dengan siklus operasi selama 264 jam [7]. Sedangkan berdasarkan acuan Gambar 1. tentang distribusi fluks neutron di reaktor RSG-GAS memperlihatkan, besarnya fluks neutron termal pada grid berilium berdasarkan pengukuran menghasilkan nilai maksimal $10^{13} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ pada grid berilium A-2. Mengacu pada hal tersebut perlu adanya penambahan waktu iradiasi yang lebih lama dari 8 hari [3,4] jika iradiasi topaz dilakukan di grid berilium reaktor RSG-GAS. Terlebih dengan mempertimbangkan penggunaan B₄C yang akan memperbesar reduksi fluks neutron. Mengacu pada hasil perhitungan sesuai Tabel 6, posisi grid A-2 memberikan nilai fluks neutron termal yang lebih kecil sehingga fluks neutron cepat dapat memberikan nilai yang cukup dalam iradiasi topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C. Secara perhitungan diperlukan waktu iradiasi batu topaz selama 189 jam pada posisi grid A-2, dianggap memberikan waktu yang efisien dalam iradiasi batu topaz dibanding dengan posisi grid lainnya. Kajian ini juga

dilakukan sebagai dasar validitas keselamatan neutronik terhadap Laporan Analisis Keselamatan (LAK) iradiasi Topaz B₄C di posisi grid A-2 tahun 2019.

KESIMPULAN

Iradiasi topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C baik tanpa sekat maupun dengan sekat, memiliki pengaruh terhadap perubahan reaktivitas, FPDR max dan fluk neutron. Jika dibandingkan antara kondisi tanpa sekat dan dengan sekat, nilai perbedaan yang dihasilkan tidak terlalu signifikan, sehingga kedua teknik ini dapat dilakukan. Jika menimbang secara teknis proses pelaksanaan iradiasi yang dilakukan, dapat dilihat penggunaan kapsul B₄C tanpa sekat akan lebih mudah dalam proses penuangan batu topaz pada kapsul. Jika melihat dari hasil perhitungan yang mengacu pada nilai ambang batas keselamatan operasi reaktor RSG-GAS terhadap nilai reaktivitas, FPDRmax dan fluk neutron, maka iradiasi batu topaz dengan kapsul dan pengarah B₄C direkomendasikan dilakukan pada grid berilium A-2. Hal ini berdasarkan pada tujuan penggunaan B₄C yang bertujuan menyaring fluk neutron termal, maka dipilih grid berilium dengan nilai fluk cepat yang cukup besar sehingga menghasilkan efisiensi waktu yang baik untuk iradiasi batu topaz.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ir. Tagor Malem Sembiring yang telah membimbing dan memberikan ilmunya dalam melakukan perhitungan keselamatan neutronik teras reaktor RSG-GAS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. M. A. Mohamed and M. A. Gahen, "Design of Fast Neutron Channels for Topaz Irradiation", *Elsevier Nuclear Engineering and Design*. 2016.
- [2] Pardi and R. F. Banyu, "Evaluasi Penanganan Iradiasi Batu Topaz Pada Operasi Reaktor Siklus 94 dan 95", *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, Vol. XV, No.1, pp. 35-44, 2018.
- [3] E. Ratnawati, K. Mustofa and A. Hidayat, "Pengaruh Iradiasi Batu Topaz Terhadap Kualitas Air Pendingin Reaktor G. A. Siwabessy", *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir PRSG*, pp. 34-39. 2012.
- [4] Y. Sumarno, Rohidi and F. A. Muslimu, "Pengaruh Iradiasi Batu Topaz Terhadap Kualitas Air Pendingin Prmer dan Keselamatan RSG-GAS", *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, Vol. XIII, No. 2, pp. 13-18, 2016.
- [5] BATAN, "Multipurpose Reactor G. A. Siwabessy Safety Analysis Report. Rev. 11. Indonesia, 2020," 2020.
- [6] S. Kuntjoro, "Analisis Pengaruh Iradiasi Fluens Neutron Cepat Terhadap Berilium Reflektor Reaktor RSG-GAS", *Tri Dasa Mega, J. Teknologi Reaktor Nuklir*, Vol. 12, No. 2, pp. 116-126, 2010.
- [7] Y. Khatchenko, T. Enik, M. Kovalenko, O. Ryabukhin, M. Bulavin, A. et al, "Study of Neutron Irradiation-Induced Color in Topaz at The Pulsed Reactor IBR-2", *Interna-*

- tional Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei*, 2017.
- [8] Z. Xia, "Effect of Neutron Radiation on The Mechanical Properties of B₄C", Departement of Mechanical, Material and Aerospace Engineering, University of Central Florida, 2011.
- [9] P. H. Liem, "Development and Verification of Batan's Standard, Two-Dimensional Multigroup Neutron Diffusion Code," *Atom Indones.*, vol. 20, no. 1, pp. 1-19, 1994.
- [10] S. Pinem, P. H. Liem, T. M. Sembiring, and T. Surbakti, "Fuel element burnup measurements for the equilibrium LEU silicide RSG GAS (MPR-30) core under a new fuel management strategy," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 98, 2016.
- [11] WIMSD5, "Deterministic Multigroup Reactor Lattice Calculations, NEA-1507/04." 2004.
- [12] A. C. Kahler et al., *Nucl. Data Sheets*, 112, pp. 2997–3036, 2011.
- [13] BAPETEN, "Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 8 Tahun 2019 tentang Keselamatan Operasi Reaktor Nondaya ," 2019.
- [14] Sutrisno, "Analisis Optimasi Target 235 U Pengkayaan Rendah (LEU) Untuk Mendukung Produksi 99 Mo Dan Target Batu Topaz di Reaktor RSG-GAS," *Ganendra, J. Iptek Nukl.*, vol. 21 No.1, pp. 25–35, 2018.