
ANALISIS SUB-KRITIKALITAS RAK BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS RSG-GAS MENGGUNAKAN ALUMINIUM

Pungky Ayu Artiani, Mirawaty, Kuat Heriyanto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail : pungky@batan.go.id

(Naskah diterima: 07-03-2017, Naskah direvisi: 02-05-2017, Naskah disetujui: 12-06-2017)

ABSTRAK

ANALISIS SUB-KRITIKALITAS RAK BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS RSG-GAS MENGGUNAKAN ALUMINIUM. Penggunaan *stainless steel* sebagai material rak penyimpanan bahan bakar nuklir bekas (BBNB) di fasilitas Kanal Hubung – Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3) berpotensi menyebabkan terjadinya korosi galvanik pada BBNB sehingga penggantian material rak penyimpanan BBNB perlu dipertimbangkan. Potensi korosi galvanik terjadi karena aluminium sebagai material utama kelongsong Bahan Bakar Nuklir (BBN) Reaktor Serba Guna - G. A. Siwabessy (reaktor RSG-GAS) berinteraksi dengan *stainless steel* sebagai material rak penyimpan BBNB. Aluminium dapat digunakan sebagai material alternatif rak penyimpanan BBNB untuk mengurangi efek korosi galvanik. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kritikalitas rak penyimpanan BBNB dengan material aluminium. Jaminan kritikalitas diperlukan untuk menjaga keselamatan fasilitas KH-IPSB3. Rak penyimpanan aluminium yang optimum dikaji dengan melakukan simulasi ukuran *pitch* dan menghitung laju serapan neutron pada kondisi normal (tidak terjadi kecelakaan). Perhitungan nilai kritikalitas ($keff$) dilakukan menggunakan program *Monte Carlo N-Particle* versi 6 (MCNP6). Model yang digunakan adalah model 3-dimensi satu rak utuh yang terisi penuh dengan BBNB di dalam kolam penyimpanan. Hasil perhitungan pada ukuran *pitch* 127 mm menunjukkan bahwa nilai $keff$ rak penyimpanan BBNB dengan material aluminium ($keff = 0,7709$) lebih besar 13,20% dibandingkan material *stainless steel* ($keff = 0,6810$). Nilai $keff$ rak penyimpanan BBNB dengan material aluminium pada ukuran tersebut masih berada dalam rentang yang disyaratkan yaitu $keff$ kurang dari 0,95. Nilai $keff$ dipengaruhi oleh ukuran *pitch*, dimana dengan berkurangnya ukuran *pitch* 1 mm dapat meningkatkan nilai $keff$ sebesar 14,24%. Nilai laju serapan neutron juga mempengaruhi nilai $keff$, di mana laju serap neutron rak penyimpanan dengan material aluminium lebih kecil dibandingkan material *stainless steel*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rak penyimpanan dengan material aluminium memenuhi aspek keselamatan untuk digunakan sebagai rak penyimpanan BBNB di KH-IPSB3 karena mempunyai nilai $keff < 0,95$ pada ukuran *pitch* lebih dari 112 mm ($keff = 0,9196$).

Kata kunci: Sub-kritikalitas, penyimpanan BBNB, rak aluminium.

ABSTRACT

SUB-CRITICALITY ANALYSIS OF SPENT FUEL RACKS AT KH-IPSB3 USING ALUMINUM.

The use of stainless steel in nuclear spent fuels storage racks of interim storage facility potentially causes galvanic corrosion so material replacement of spent fuels storage racks needs to be considered. Galvanic corrosion is due to interaction between aluminium as in nuclear fuel of Multipurpose Research Reactor - G. A. Siwabessy (RSG-GAS reactor) and stainless steel as storage rack material for nuclear spent fuel. The purpose of this study is to assess the criticality of nuclear spent fuel storage racks using aluminum material to reduce galvanic corrosion effect. criticality guarantee is necessary to maintain the safety of nuclear spent fuel interim storage facility. Optimum criticality of aluminum storage rack is assessed by varying pitch size and calculating neutron absorption rate performed under normal condition (not an accident). criticality (k_{eff}) calculation is performed using Monte Carlo N-Particle version 6 (MCNP6) code. The model used in this study is a 3-dimensional model where racks are filled fully with spent fuels in the storage pool. The calculations show that nuclear spent fuel storage rack stainless steel materials ($k_{eff} = 0.6810$) compared to aluminum ($k_{eff} = 0.7709$) in the size of 127 mm pitch, k_{eff} increased by 13.20%, but still within the value of safety requirement ($k_{eff} \leq 0.95$). k_{eff} is affected by pitch size, where the reduction in the size of 1 mm pitch can increase the k_{eff} of 14.24%. Neutron absorption rate also affects k_{eff} , where neutron absorption rate in aluminum storage racks smaller than stainless steel. Storage racks using aluminum materials meet safety aspect to use as a storage rack in nuclear spent fuel interim storage facility because it has a k_{eff} less than 0.95 on a pitch size more than 112 mm ($k_{eff} = 0.9196$).

Keywords: *Sub-criticality, spent fuel storage, aluminium rack.*

PENDAHULUAN

Kanal Hubung - Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (KH-IPSB3) merupakan salah satu fasilitas penting di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTLR-BATAN). Fasilitas ini adalah tempat untuk menyimpan sementara BBNB reaktor RSG-GAS[1]. Penyimpanan ini merupakan tahapan penting pada daur Bahan Bakar Nuklir agar radiasi yang ditimbulkan tidak berdampak terhadap pekerja, masyarakat dan lingkungan. Bahan bakar nuklir bekas disimpan di dalam rak-rak pada kolam KH-IPSB3 selama puluhan tahun sebelum dipindahkan ke fasilitas penyimpanan kering atau penyimpanan lestari[1]. Bahan Bakar Nuklir Bekas ini masih mengandung sisa bahan fisil uranium sehingga berpotensi menimbulkan kecelakaan kritikalitas jika tidak disimpan dalam kondisi yang tidak tepat. Oleh karena itu, integritas BBNB di kolam KH-IPSB3 harus terjamin.

Saat ini rak penyimpanan BBNB terbuat dari *stainless steel*. Material ini digunakan karena mempunyai sifat tahan terhadap korosi[2] dan memiliki nilai tampang lintang serapan neutron yang tinggi sebesar $2,86 \times 10^{-4}$ [3,4]. Kelongsong dan pendukung elemen bakar reaktor RSG-GAS terbuat dari aluminium (AlMgSi dan AlMg2)[5]. Adanya kontak antara material *stainless steel* dan AlMg2 pada lingkungan yang sama di kolam KH-IPSB3 dapat menyebabkan terjadinya korosi galvanik. Potensi terjadinya korosi galvanic ini dapat merusak kelongsong BBNB sehingga dapat menimbulkan kontaminasi dalam kolam[6],[7]. Oleh karena itu, penggantian material rak dengan aluminium perlu dilakukan untuk mencegah kerusakan lebih lanjut pada kelongsong BBNB. Penggunaan rak penyimpanan dengan aluminium telah digunakan di Afika Selatan[9].

Material *stainless steel* dan aluminium mempunyai nilai tampang lintang serap neutron yang berbeda sehingga

penggantian material rak akan berpengaruh terhadap perubahan nilai kritikalitas. Nilai kritikalitas merupakan perbandingan jumlah neutron yang dihasilkan suatu generasi dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya yang dinyatakan sebagai persamaan. Perubahan jumlah neutron ini terjadi karena adanya perubahan laju reaksi pada rak BBNB. Laju reaksi ini dipengaruhi oleh nilai tampang lintang serap neutron suatu material dan jarak antar bahan bakar. Korelasi ini dapat dilihat pada persamaan 1.

$$\text{Laju reaksi} = \sigma \cdot I \cdot N \cdot A \cdot X \quad (1)$$

Dimana,

σ = tampang lintang mikroskopis reaksi neutron

I = intensitas neutron

N = kerapatan radionuklida (inti/volume)

A = tampang lintang (barn)

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

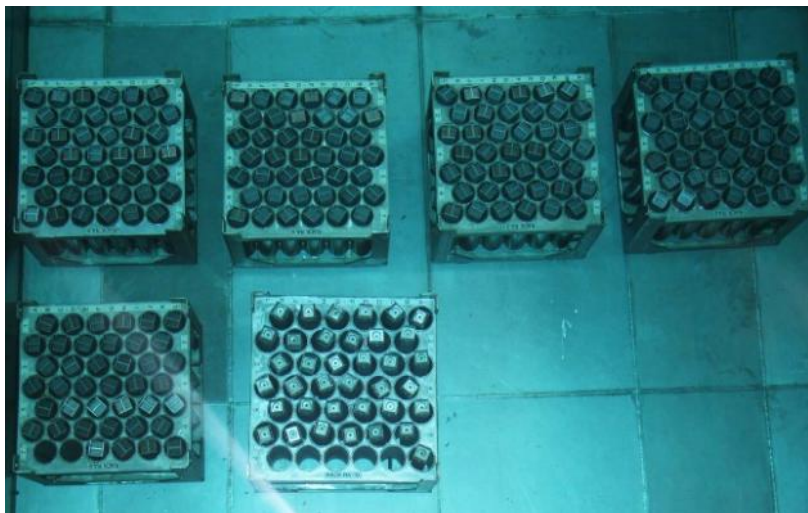
X = jarak (m)

Penelitian ini akan menganalisis nilai kritikalitas material bakar nuklir bekas di dalam rak aluminium pada fasilitas KH-IPSB3 dengan mensimulasikan variasi ukuran *pitch* dan menghitung laju serapan neutron. Penelitian ini dilakukan pada kondisi yang normal. Variasi ukuran *pitch* dilakukan untuk menentukan ukuran *pitch* optimum rak penyimpanan BBNB sedangkan laju serapan neutron dihitung untuk mengetahui besar serapan neutron setiap posisi BBNB[10]. Perhitungan kritikalitas dilakukan dengan menggunakan program *Monte Carlo N-Particle 6* versi 1.0 (MCNP6) yang telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya[4][7][10][11][12][13]. Perhitungan laju serapan neutron dilakukan dengan menggunakan *tally F4* pada program MCNP6 [10]. Rak penyimpanan dan BBNB akan dimodelkan secara rinci dalam geometri 3-dimensi untuk mendapatkan nilai kritikalitas (*keff*) yang akurat[14].

a) Deskripsi KH-IPSB3 dan Elemen Bakar RSG-GAS

KH-IPSB3 terdiri dari dua fasilitas yaitu fasilitas kanal hubung dan kolam penyimpanan BBNB. Fasilitas kanal hubung digunakan sebagai jalur pemindahan BBNB dan bahan teriradiasi, sedangkan kolam penyimpanan digunakan untuk menyimpan

sementara BBNB dan bahan teriradiasi. Rak penyimpanan untuk BBNB berukuran 94 cm x 94 cm. Setiap rak mempunyai lubang tempat penyimpanan BBNB sebanyak 42 buah dengan susunan *triangular* 7 x 6, ukuran *pitch* 12,7 cm dan diameter lubang 14 cm. Rak penyimpanan BBNB yang terdapat pada KH-IPSB3 ditunjukkan pada Gambar 1.



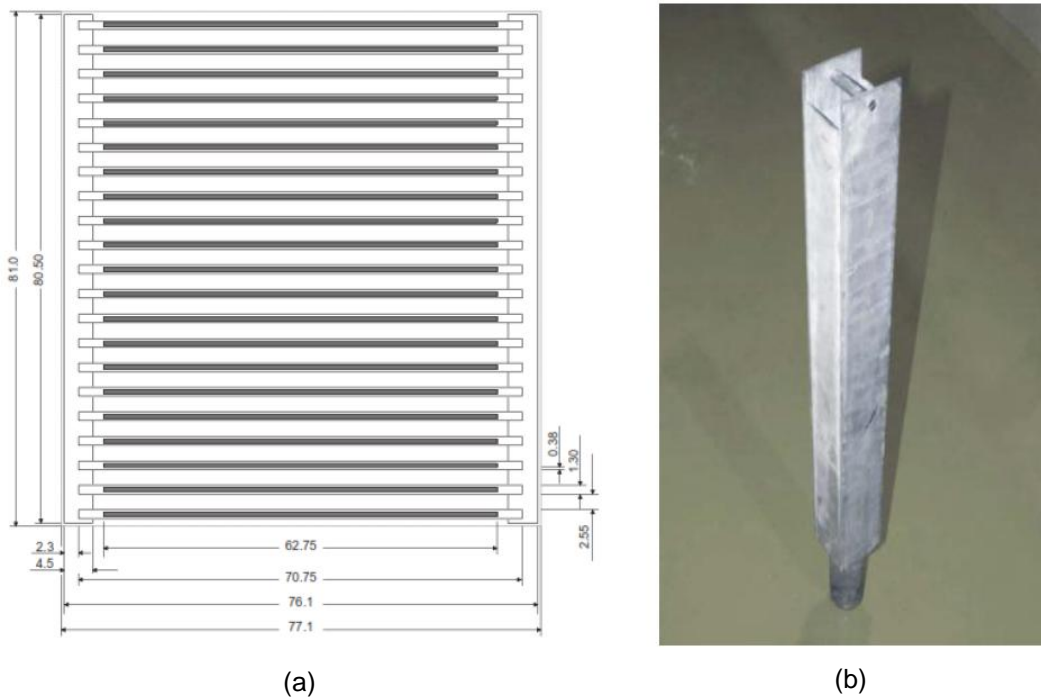
Gambar 1. Rak Penyimpanan BBNB dalam kolam KH-IPSB3[1]

Reaktor Serba Guna-G. A. Siwabessy merupakan reaktor riset tipe *material testing reactor* (MTR) dengan elemen bakar uranium silisida U_3Si_2/Al yang memiliki pengayaan uranium ^{235}U 19,75 % dan densitas 2,96 gU/cm². Setiap elemen bakar terdiri dari 21 plat sejajar dengan ketebalan *meat* bahan bakar 0,54 mm; ketebalan

kelongsong (AlMg₂) 0,38 mm; tinggi elemen bakar 6 mm; dan massa total ^{235}U per elemen bakar 250 g. Celah kanal yang terbentuk antar plat bahan bakar mempunyai ketebalan sebesar 2,55 mm[15],[16]. Gambar dan data rinci mengenai elemen bakar reaktor RSG-GAS dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 2.

Tabel 1. Spesifikasi elemen bakar dari RSG-GAS [14,15].

Dimensi (mm x mm x mm)	77,1 x 81 x 600
Tebal plat bahan bakar (mm)	1,3
Lebar kanal pendingin (mm)	2,55
Jumlah plat per <i>Fuel Element</i> (FE)	21
Bahan Kelongsong	AlMg ₂
Tebal kelongsong (mm)	0,38
Dimensi bahan bakar (mm x mm x mm)	0,54 x 62,75 x 600
Bahan bakar	U_3Si_2/Al
Pengayaan ^{235}U (w/o)	19,75 %
Densitas uranium (gU/cm ³)	2,96
Berat ^{235}U per FE (g)	250

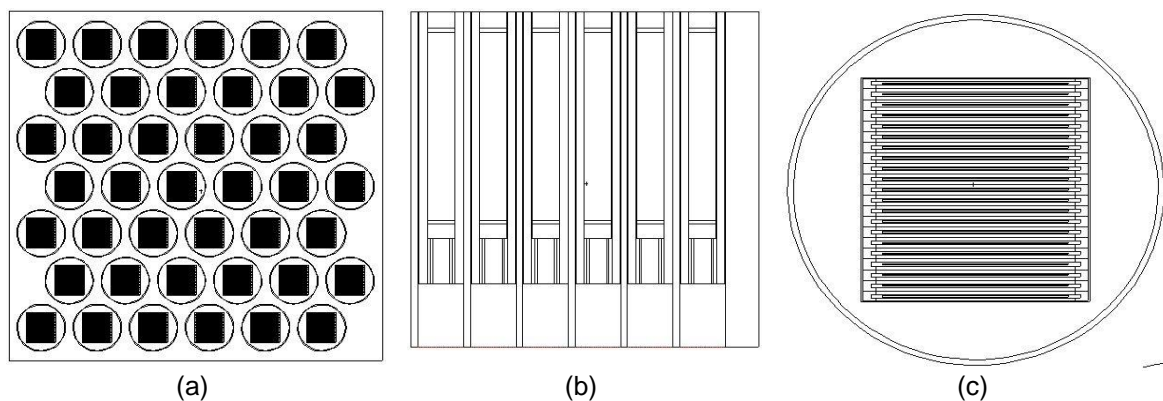


Gambar 2.a) Dimensi BBNB elemen bakar standar reaktor RSG GAS, ukuran dalam mm [15],[16]
 b) Tampak utuh BBNB elemen bakar reaktor RSG-GAS

METODOLOGI

Perhitungan besarnya nilai sub-kritikalitas dilakukan menggunakan program MCNP 6 versi 1.0. Gambar 3 menunjukkan model 3 dimensi rak penyimpanan BBNB reaktor RSG GAS yang dimodelkan secara akurat. Gambar 3a menunjukkan tampak

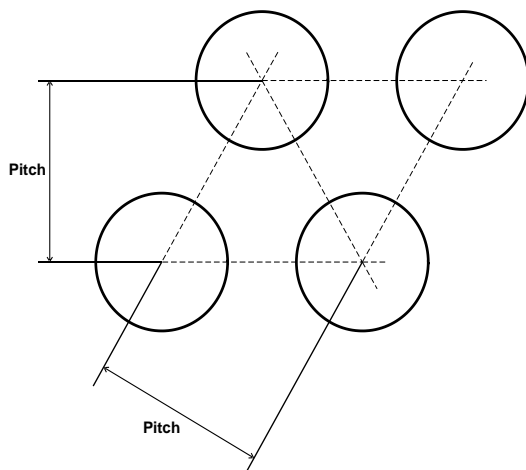
atas model geometri rak penyimpanan yang terisi BBNB penuh, sedangkan Gambar 3b menunjukkan tampak samping serta Gambar 3c adalah tampak atas geometri bundel BBNB. Gambar 3 ini akan digunakan sebagai acuan atau dasar untuk melakukan perhitungan nilai K_{eff} .



Gambar 3. Rak Penyimpanan BBNB 3 Dimensi
 (a) Geometri tampak atas;
 (b) Geometri tampak samping;
 (c) Geometri rinci BBNB tampak atas

Untuk mendapatkan kondisi yang paling reaktif dalam perhitungan kritikalitas[13],[16],[17], simulasi pada penelitian ini menggunakan BBNB dalam kondisi *fresh* (belum diiradiasi), meskipun kenyataannya BBNB yang disimpan di KH-IPSB3 merupakan bahan bakar yang telah diiradiasi. Perhitungan kritikalitas dilakukan dengan menggunakan beberapa parameter asumsi sebagai berikut :

1. Temperatur air pendingin pada kolam penyimpanan dibuat sebesar 25 °C dan homogen disepanjang kolam.
2. Densitas air pendingin kolam penyimpanan pada temperatur 25 °C sebesar 0,998 g/cm³.
3. Kondisi air pendingin disepanjang kanal elemen bakar sama dengan kondisi air kolam.

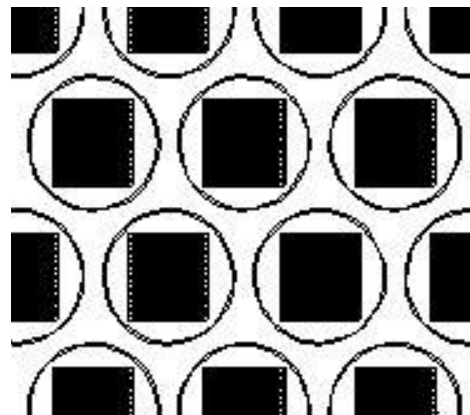


Gambar 4. Jarak antar titik tengah (*pitch*)

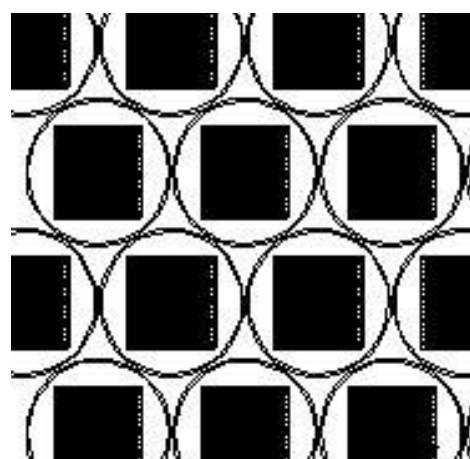
Selain parameter diatas, dalam penelitian ini diperlukan beberapa simulasi untuk mengetahui pengaruh yang ditimbulkan jika material rak KH-IPSB3 diganti dengan aluminium. Tampang lintang serapan neutron *stainless steel* dan aluminium yang berbeda memerlukan simulasi untuk mendapatkan ukuran *pitch* yang optimum (rekomendasi). Beberapa simulasi yang akan digunakan antara lain sebagai berikut : :

1. Bahan rak yang disimulasikan adalah *stainless steel-306* dan aluminium.

2. Sub-kritikalitas dihitung dengan variasi ukuran *pitch* sebesar 127 mm; 126 mm; 124 mm; 122 mm; 120 mm; 118 mm; 116 mm; 114 mm; 112 mm; dan 110 mm, untuk kedua bahan rak. *Pitch* merupakan jarak terdekat antara lubang BBNB yang diukur dari masing-masing titik tengah kedua lubang tersebut seperti pada Gambar 4, sedangkan pengaruh perubahan ukuran *pitch* dapat ditunjukkan pada Gambar 5.
3. Penentuan laju serapan neutron dilakukan untuk ukuran *pitch* 127 mm.
4. Optimasi ukuran *pitch* dilakukan dengan memakai nilai batas $k_{eff} \leq 0,95 \pm 3\sigma$ (99% tingkat kepercayaan)[14].

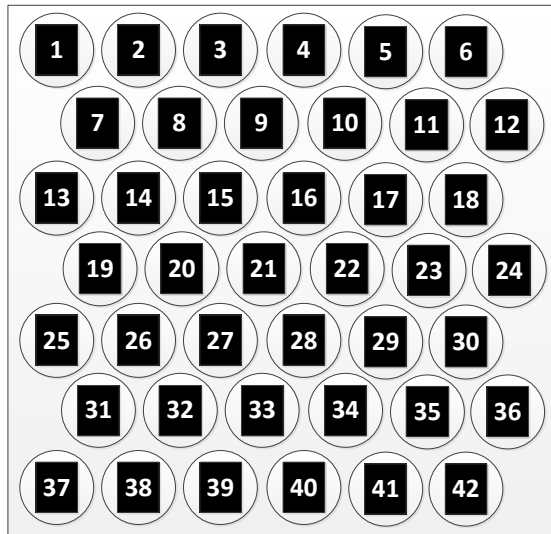


(a)



(b)

Gambar 5. Perubahan ukuran *pitch*
(a) Ukuran *pitch* 127 mm
(b) Ukuran *pitch* 110 mm



Gambar 6. Penomoran posisi zona untuk penentuan laju serapan neutron

Perhitungan laju serapan neutron pada penelitian ini dilakukan dengan

Tabel 2. Nilai K_{eff} dan laju serapan neutron untuk dengan *pitch* 127 mm menggunakan ENDF/B-VI

Bahan	$K_{eff} \pm 3\sigma$	Laju serapan neutron (MeV/cm ²)
<i>Stainless steel</i>	0,6810 ± 0,0011	2,86E-04
Aluminium	0,7709 ± 0,0010	7,74E-05

Hasil ini menunjukkan adanya kenaikan nilai keff sebesar 13,2% jika menggunakan material aluminium. Kenaikan yang signifikan ini diakibatkan oleh aluminium yang memiliki laju serapan neutron yang lebih rendah 72,9% dibanding *stainless steel*

menggunakan sumber 50.000 partikel untuk 300 siklus. Pada 50 siklus pertama digunakan untuk mencari konvergensi perhitungan. Laju serapan neutron dihitung untuk 42 zona BBNB dengan kartu *tally* F4. Pembagian zona dilakukan berdasarkan letak bahan bakar seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 6. Perhitungan dilakukan untuk 2 jenis data nuklir yaitu ENDF/B-VI.0 dan ENDF/B-VII.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai K_{eff} rak penyimpanan bahan *stainless steel* dan aluminium dengan ukuran *pitch* yang digunakan saat ini di dalam KH-IPSB3 yaitu 127 mm ditunjukkan pada Tabel 2.

seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Meskipun demikian, nilai keff rak aluminium penyimpanan aluminium masih jauh dari nilai batas yaitu keff ≤ 0,95 [2], [19], sehingga dapat digunakan untuk rak penyimpanan BBNB.

Tabel 3. Nilai Tampang Lintang Serap Neutron

Bahan	Nilai Tampang Lintang Serap Neutron
Al	0,231
Fe	2,56

Tabel 4. Nilai K_{eff} pada rak penyimpanan bahan *Stainless steel*

No	Ukuran <i>Pitch</i> (mm)	$K_{eff} \pm 3\sigma$	
		ENDF/B-VI	ENDF/B-VII
1	127	0,6810 ± 0,0011	0,6821 ± 0,0010
2	126	0,6891 ± 0,0010	0,6893 ± 0,0011
3	124	0,7040 ± 0,0010	0,7043 ± 0,0010
4	122	0,7197 ± 0,0010	0,7204 ± 0,0010
5	120	0,7361 ± 0,0010	0,7361 ± 0,0011

No	Ukuran <i>Pitch</i> (mm)	$K_{eff} \pm 3\sigma$	
		ENDF/B-VI	ENDF/B-VII
6	118	$0,7525 \pm 0,0011$	$0,7528 \pm 0,0011$
7	116	$0,7695 \pm 0,0011$	$0,7699 \pm 0,0011$
8	114	$0,7873 \pm 0,0011$	$0,7873 \pm 0,0011$
9	112	$0,8048 \pm 0,0011$	$0,8055 \pm 0,0011$
10	110	$0,8232 \pm 0,0011$	$0,8242 \pm 0,0011$

Tabel 5. Nilai K_{eff} pada rak penyimpanan bahan Aluminium

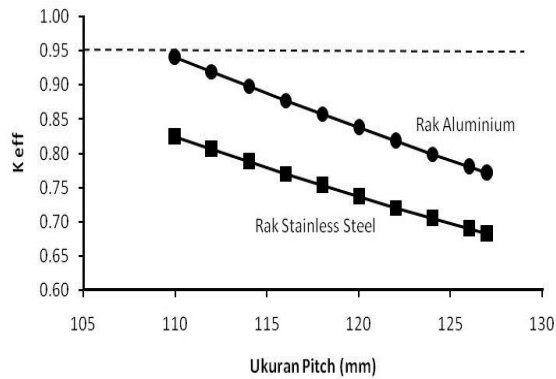
No	Ukuran <i>Pitch</i> (mm)	$K_{eff} \pm 3\sigma$	
		ENDF/B-VI	ENDF/B-VII
1	127	$0,7709 \pm 0,0010$	$0,7716 \pm 0,0010$
2	126	$0,7799 \pm 0,0011$	$0,7800 \pm 0,0010$
3	124	$0,7987 \pm 0,0010$	$0,7991 \pm 0,0010$
4	122	$0,8177 \pm 0,0010$	$0,8182 \pm 0,0010$
5	120	$0,8371 \pm 0,0010$	$0,8378 \pm 0,0010$
6	118	$0,8576 \pm 0,0010$	$0,8578 \pm 0,0010$
7	116	$0,8778 \pm 0,0011$	$0,8784 \pm 0,0011$
8	114	$0,8985 \pm 0,0011$	$0,8991 \pm 0,0011$
9	112	$0,9196 \pm 0,0010$	$0,9199 \pm 0,0010$
10	110	$0,9405 \pm 0,0011$	$0,9411 \pm 0,0011$

Tabel 4 dan Tabel 5 menunjukkan nilai keff rak penyimpanan material *stainless steel* dan aluminium untuk berbagai ukuran *pitch*. Nilai keff meningkat dengan berkurangnya ukuran *pitch*, di mana untuk rak *stainless steel* mengalami kenaikan sebesar 20,88% dan rak aluminium sebesar 22%. Tabel 5 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa ukuran *pitch* 110 mm untuk rak aluminium memberikan nilai keff ($0,9655 \pm 0,0010$) yang melebihi nilai batas keff yang disyaratkan. Akan tetapi jika menggunakan data nuklir ENDF VII nilai keff menjadi $0,9412 \pm 0,0011$, yang nilainya mendekati dari nilai keff yang disyaratkan. Nilai keff menggunakan data nuklir ENDF/B-VII memberikan nilai keff lebih kecil dibanding data nuklir ENDF/B-VI dengan nilai selisih rata-rata 2,69 %. *Pitch* dengan ukuran 110 mm sebaiknya tidak digunakan karena nilai keff dari data nuklir ENDF B/VI lebih besar dari nilai batas keff yang disyaratkan, dengan demikian ukuran *pitch* yang optimum adalah sebesar 112 mm.

Salah satu usaha untuk mencegah potensi korosi galvanik adalah mengganti rak penyimpanan dengan menggunakan material aluminium. Material ini dapat digunakan sebagai rak penyimpanan BBNB dengan dimensi yang sama pada rak penyimpanan *stainless steel* ukuran *pitch* 127 mm, namun tidak dapat digunakan dengan dimensi ukuran *pitch* 110 mm karena nilai batas keff nya melebihi yang disyaratkan.

Penggantian material rak dari *stainless steel* menjadi aluminium juga berpengaruh terhadap faktor sensitivitas ukuran *pitch* pada rak BBNB. Gambar 7 menunjukkan bahwa penggantian material rak menyebabkan kenaikan nilai kritikalitas sebesar 13,20 % untuk ukuran *pitch* 127 mm. Persentase kenaikan nilai kritikalitas semakin meningkat hingga 14,24 % dengan berkurangnya ukuran *pitch*. Persentase kenaikan nilai kritikalitas terbesar terjadi pada ukuran *pitch* untuk jarak antar lubang yang berhimpit. Hal ini disebabkan oleh

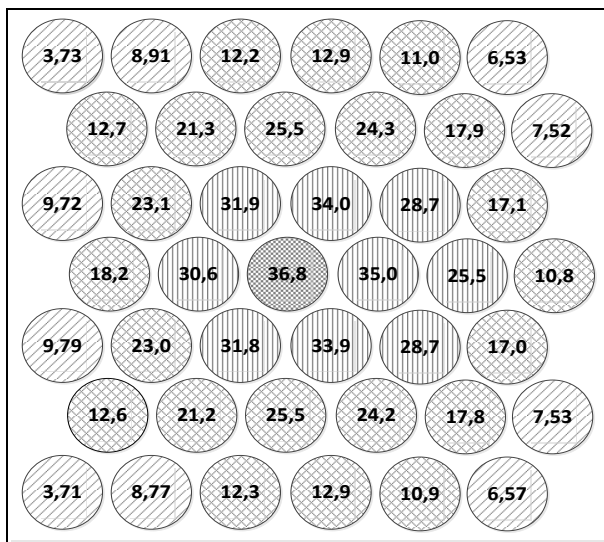
kenaikan nilai positif reaktivitas ketika BBNB didekatkan[14].



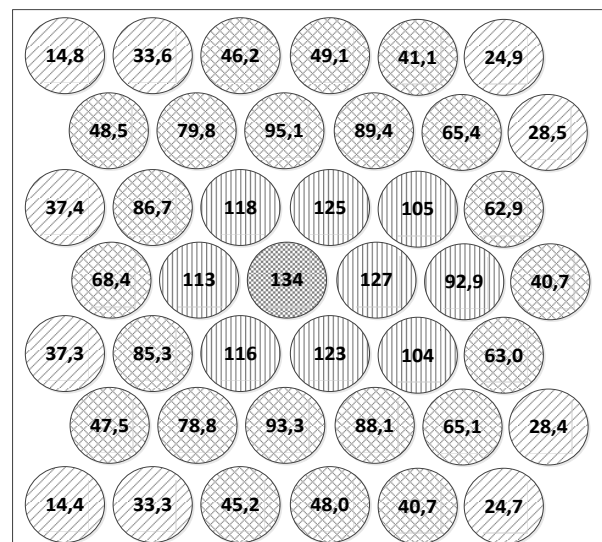
Gambar 7. Pengaruh ukuran *pitch* terhadap K_{eff} menggunakan ENDF/B-VI

Gambar 8 menunjukkan secara rinci laju serapan neutron di setiap BBNB untuk rak penyimpanan menggunakan material

stainless steel dan aluminium. Laju serapan neutron dibagi atas 10 nilai terendah, 10 nilai tertinggi dan selain itu adalah nilai tengah. Laju serapan neutron tertinggi berada pada zona 21, baik di rak penyimpanan menggunakan material *stainless steel* maupun aluminium. Nilai keff terendah terdapat di zona 37 dan yang tertinggi di 10 zona terjadi di daerah tengah rak. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa laju serapan neutron tidak dipengaruhi oleh material rak. Hal ini terjadi karena seluruh BBNB memiliki fraksi bakar yang sama yaitu *fresh fuel*. Jika distribusi fraksi bakar berbeda maka laju serapan neutron berbeda pula.



(a)



(b)

Keterangan :



Gambar 8. Laju Serapan Neutron (dalam 10^{-7} MeV/cm^2) untuk:

(a) Rak aluminium

(b) Rak *stainless steel*

SIMPULAN

Hasil perhitungan pada ukuran *pitch* 127 mm menunjukkan bahwa nilai keff rak penyimpanan BBNB dengan material

aluminium ($k_{eff} = 0,7709$) lebih besar 13,20% dibandingkan *stainless steel* ($k_{eff} = 0,6810$). Nilai keff rak penyimpanan BBNB menggunakan material aluminium pada ukuran tersebut masih berada dalam

rentang yang disyaratkan. Nilai keff dipengaruhi oleh ukuran *pitch*, di mana dengan berkurangnya ukuran *pitch* 1 mm dapat meningkatkan nilai keff 14,24%. Nilai laju serapan neutron juga mempengaruhi nilai keff, di mana laju serapan neutron rak penyimpanan menggunakan material aluminium lebih kecil dibandingkan material dapat meningkatkan nilai K_{eff} 14,24% *stainless steel*. Rak penyimpanan aluminium masih memenuhi aspek keselamatan untuk digunakan sebagai rak penyimpanan BBNB di KH-IPSB3 karena mempunyai nilai keff < 0,95 pada ukuran *pitch* lebih dari 112 mm ($k_{\text{eff}} = 0,9196$).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR), Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang telah memberikan dana penelitian ini, serta kepada Ir. Tagor M. Sembiring dan Ir. R. Sumarbagiono, M.T (Kepala Bidang Teknologi Pengolahan dan Penyimpanan Limbah, PTLR, BATAN) atas diskusi dan bantuannya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Nuraeni and R. Sumarbagiono, "Upaya Pencegahan Korosi Galvanik Pada Kelongsing Bahan Bakar Nuklir Bekas di Fasilitas Kanal Hubung-Instalasi Penyimpanan Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3)." *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XIII*, 2015.
- [2] "Dokumen Laporan Analisis Kecelakaan di Kanal Hubung-Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3)," 2015.
- [3] A. T. Silva, M. Mattar Neto, R. P. Mourao, L. L. Silva, C. C. Lopes, and M. C. C. Silva, "Options for the interim storage of IEA-R1 research reactor spent fuels," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 50, no. 7, pp. 836–844, 2008.
- [4] H. E. E. D. Sohn and J. K. Kim, "Effect of stainless steel plate position on neutron multiplication factor in spent fuel," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 75–82, 2011.
- [5] M. K. A, D. Kisworo, D. Hariyadi, and Sigit, "Ketahanan korosi bahan struktur AIMg-2 dalam media air pasca perlakuan panas dan pendinginan," *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, vol. 1, no. 2, pp. 88–94, 2005.
- [6] R. Kusumastuti and G. R. Sunaryo, "Analisis laju korosi material AIMg2 dan SS304 dalam lingkungan air kolam penyimpanan bahan bakar bekas (ISSF)," *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XII, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN*, 2014, hal. 78–85.
- [7] G. R. Sunaryo and Sriyono, "Spent fuel storage corrosion management," *International Conference on Research. Reactor: Safe Management. And Effective Utilization*, 2011, pp. 1–7.
- [8] V. Barkauskas, R. Plukiene, and A. Plukis, "Actinide-only and full burn-up credit in criticality assessment of RBMK-1500 spent nuclear fuel storage cask using axial burn-up profile," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 307, pp. 197–204, 2016.
- [9] H. J. Choi, D. Cho, D. Kook, and J. Choi, "Current status of spent fuels and the development of computer programs for the PWR spent fuel management in Korea," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 53, no. 3, pp. 290–297, 2011.
- [10] J. F. Briesmeister, "MCNPTM—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," *Los Alamos National Laboratory*, p. 790, 2000.
- [11] P. Wang, X. Tang, F. Chen, and D. Chen, "The design, fabrication and

- safety evaluation of a novel spent fuel storage basket material,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 284, pp. 91–96, 2015.
- [12] A. Y. Chen, Y. F. Chen, J. N. Wang, R. J. Sheu, Y. W. H. Liu, and S. H. Jiang, “A comparison of dose rate calculations for a spent fuel storage cask by using MCNP and SAS4,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 2296–2305, 2008.
- [13] R. G. Abrefah, S. A. Birikorang, B. J. B. Nyarko, J. J. Fletcher, and E. H. K. Akaho, “Design of serpentine cask for Ghana research reactor-1 spent nuclear fuel,” *Progress in Nuclear Energy*, vol. 77, pp. 84–91, 2014.
- [14] T. Y. Han, C. J. Park, B. C. Lee, and J. M. Noh, “Uncertainty analysis of criticality safety for the plate type fuel assembly storage rack,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 53, pp. 82–89, 2013.
- [15] A. B. Ginting and P. H. Liem, “Absolute burnup measurement of LEU silicide fuel plate irradiated in the RSG-GAS multipurpose reactor by destructive radiochemical technique,” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 85, pp. 613–620, 2015.
- [16] P. H. Liem and T. M. Sembiring, “Development of new ORIGEN2 data library sets for research reactors with light water cooled oxide and silicide LEU (20 w/o) fuels based on JENDL-3.3 nuclear data,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 262, pp. 52–62, 2013.
- [17] D. Čalić and M. Ravnik, “Criticality calculations of spent fuel in deep geological repository,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, no. 3, pp. 668–671, 2010.
- [18] R. F. Mahmoud, M. K. Shaat, M. E. Nagy, S. A. Agamy, and A. A. Abdelrahman, “Burn-up credit in criticality safety of PWR spent fuel,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 280, pp. 628–633, 2015.
- [19] International Atomic Energy Agency, “Measurement and storage of research reactor spent nuclear fuel,” *Proceedings of a technical meeting, United Kingdom*, 2013.

