

KAJIAN KESELAMATAN REAKTOR KARTINI DENGAN TERAS BERBAHAN BAKAR PLAT U_3Si_2-Al

SAFETY ASSESSMENT OF KARTINI REAKTOR THAT CORE IS LOADED BY U_3Si_2-Al FUEL PLAT ELEMENT

Tri Wulan Tiptono, Tri Nugroho

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6010 ykbb, Yogyakarta 55281
e-mail: ri_siji@yahoo.com

Diterima 01 Mei 2015, diterima dalam bentuk perbaikan 30 Juni 2015, disetujui 27 Juli 2015

ABSTRAK

KAJIAN KESELAMATAN REAKTOR KARTINI DENGAN TERAS BERBAHAN BAKAR PLAT U_3Si_2-Al . Telah dilakukan kajian keselamatan reaktor Kartini dengan teras berbahan bakar plat U_3Si_2-Al . Bahan bakar reaktor TRIGA yang tidak diproduksi lagi, itu berarti bahwa pada suatu saat bahan bakar reaktor Kartini akan habis. Berdasar hal tersebut maka diusulkan teras reaktor pengganti dengan bahan bakar plat U_3Si_2-Al , sehingga pengoperasian reaktor riset masih dapat dipertahankan. Modifikasi teras reaktor harus mendapat ijin dari BAPETEN dan salah satu syarat yang harus dipenuhi adalah kajian keselamatan. Oleh karena itu makalah ini menyajikan hasil kajian keselamatan teras dari aspek neutronik dari beberapa model teras yang mungkin dapat digunakan sebagai pengganti teras reaktor TRIGA. Dua parameter reaktor yang digunakan sebagai indikator keselamatan adalah nilai faktor puncak daya (perbandingan daya maksimum dengan daya rerata teras) dari suatu teras reaktor dan nilai faktor perlipatan neutron efektif pada kondisi penyerap di dalam teras. Kedua parameter reaktor tersebut dapat dihitung dengan program MCNP. Dari beberapa model teras yang dikaji diperoleh hasil bahwa nilai faktor daya puncak antara 1,64 – 1,84 yang merupakan nilai pada umumnya terjadi dalam operasi reaktor. Nilai faktor perlipatan neutron efektif dengan penyerap dalam teras berkisar 0,53 – 0,85 berarti tingkat subkritik yang cukup. Model teras paling cocok sebagai pengganti teras TRIGA adalah model konfigurasi teras reaktor JRR4.

Kata kunci: reaktor, U_3Si_2-Al , keselamatan reaktor, perlipatan neutron, MCNP

ABSTRACT

SAFETY ASSESSMENT OF KARTINI REAKTOR THAT CORE IS LOADED BY U_3Si_2-Al FUEL PLAT ELEMENT. Safety assessment of Kartini reactor using core is loaded by U_3Si_2-Al fuel plat element has been done. TRIGA fuel element production is stopped, it means that at any time fuel elements of Kartini reactor are finished. Based on that fact, a core substitute of Kartini reactor with U_3Si_2-Al is proposed such that that operation of the Kartini reactor can be maintained. Core modification of Kartini reactor can be performed when get licensing from the Regulatory Body (BAPETEN), one of the requirement is a safety assessment. This paper present safety assessment of Kartini reactor is loaded by U_3Si_2-Al fuel element with several models of core configuration. Power Peaking Factor and an effective neutron multiplication factor when the control rod is inserted are two reactor parameters which have relationship to the reactor operation safety. Those two reactor parameters can be calculated by using MCNP computer code. Based on the calculation of the two reactors parameters of several core models variation shown that values of power peaking factor of the several core models are on ranges between 1,6 to 1,9 and the effective neutron multiplication factor with control rods inserting 0,53 to 0,86. Those values are on the safety limit ranges, and the Japan Reactor Research-4 (JRR-4) core configuration model is one of the fourth core configuration models which most suitable to be dedicated to substitute of Kartini reactor core.

Keywords: reactor, U_3Si_2-Al , fuel element, reactor safety, neutron multiplication, MCNP

PENDAHULUAN

Bahan bakar U_3Si_2-Al dengan pengayaan rendah telah sukses digunakan di beberapa reaktor riset jenis Reaktor Uji Material diberbagai negara baik di Eropa, Amerika maupun Asia, reaktor riset di Mesir ⁽¹⁾, reaktor riset di

Swiss⁽²⁾, reaktor riset di Teheran⁽³⁾, reaktor riset di Brasil⁽⁴⁾, reaktor riset di Universitas Kyoto⁽⁵⁾ dan reaktor riset di Argentina⁽⁶⁾. Pada umumnya reaktor-reaktor riset tersebut berdaya tinggi (di atas 10 MW). Makalah ini akan mengkaji keselamatan tentang reaktor riset daya rendah (100 kW) dengan bahan bakar U_3Si_2 -Al dari aspek neutroniknya saja. Reaktor riset daya 100 kW berbahan bakar plat U_3Si_2 -Al akan dikaji aspek keselamatannya, kemudian didekikasikan sebagai pengganti teras reaktor Kartini yang saat ini berbahan bakar reaktor TRIGA. Reaktor Kartini adalah reaktor riset jenis TRIGA, kapasitas daya maksimum 250 kW, saat ini dioperasikan pada daya 100 kW. Oleh karena produksi bahan bakar TRIGA telah dihentikan oleh General Atomic, maka perlu dipikirkan adanya modifikasi teras reaktor TRIGA, supaya kelangsungan operasi reaktor Kartini dapat dipertahankan. Salah satu alternatif adalah dimodifikasi dengan bahan bakar plat U_3Si_2 -Al atau UMo-Al.

Modifikasi teras reaktor harus mendapat ijin dari Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) melalui revisi LAPORAN ANALISIS KESELAMATAN dan dilengkapi dengan Kajian Keselamatan Teras Berbahan Plat U_3Si_2 -Al sebagai teras reaktor modifikasi dari teras reaktor berbahan bakar TRIGA (UZrH dan berbentuk silinder) dengan konfigurasi bahan bakar melingkar menjadi konfigurasi kotak sesuai jumlah perangkat bahan bakar. Modifikasi teras reaktor diusahakan tidak merubah ukuran reflektor dengan demikian perubahan hanya terasnya saja. Beberapa model konfigurasi teras akan dikaji parameter keselamatannya dengan tujuan agar dapat dipilih model konfigurasi teras yang paling sesuai untuk modifikasi teras reaktor Kartini. Dengan demikian ukuran perangkat bahan bakar dan jumlah disesuaikan dengan ukuran teras reaktor Kartini.

Keselamatan reaktor menjadi pertimbangan dalam memperoleh ijin modifikasi teras reaktor Kartini. Dari aspek neutronik, indikator bahwa suatu reaktor dapat dioperasikan dengan selamat jika di dalam teras reaktor tidak ada titik panas atau dikenal sebagai faktor puncak daya yang melampaui batas yang diijinkan. Nilai faktor puncak daya adalah perbandingan antara daya maksimum dengan daya rerata teras, dan juga perbandingan antara daya tertinggi dengan rerata aksialnya. Untuk keperluan tersebut maka dihitung distribusi fluks neutron pada masing-masing plat pada seluruh teras reaktor. Tingkat kekritisan saat reaktor *shut-down* termasuk salah satu indikator untuk menentukan keselamatan reaktor, yang dilihat dari nilai faktor perlipatan neutron efektifnya. Nilai-nilai parameter reaktor tersebut dapat ditentukan dengan perhitungan kekritisan dan distribusi fluks neutron. Dari perhitungan kekritisan dapat ditentukan nilai faktor perlipatan neutron untuk kondisi batang kendali/penyerap di dalam dan di luar teras serta seperti kondisi operasi, di mana sebagian penyerap ditarik dari teras dan lainnya ditarik keluar seluruhnya dari teras untuk mendapat kondisi kritis (nilai faktor perlipatan neutron efektif 0,99 - 1,0), perhitungan kekritisan dan distribusi dilakukan dengan program MCNP.

Faktor daya puncak dan perlipatan neutron sebagai parameter keselamatan operasi dalam modifikasi teras reaktor Kartini dilakukan untuk empat model teras dengan bahan plat U_3Si_2 -Al sebagai berikut.

1. Model teras reaktor dengan konfigurasi terdiri 12 perangkat bahan bakar dan 4 perangkat bahan bakar dengan penyerap seperti lazimnya teras reaktor jenis Reaktor Uji Material^(7,8,9) (seperti Reaktor Serba Guna-GA Siwabessy).
2. Model teras reaktor dengan konfigurasi teras terdiri 16 perangkat bahan bakar, dengan penyerap berbentuk plat dengan lebar sama dengan lebar teras di posisikan di antara dua kelompok perangkat bahan bakar (model konfigurasi teras reaktor *Japan Research Reactor- 4 (JRR-4)*)⁽¹⁰⁾.
3. Model teras seperti c, tetapi lebar penyerap sama dengan lebar dua perangkat bahan bakar (lebar setengah teras).
4. Model teras reaktor dengan konfigurasi teras terdiri dari 16 perangkat bahan bakar dengan perangkat kendali silang dan di posisikan di tengah teras seperti konfigurasi teras reaktor *Jules Horowitz Reactor (JHR)*⁽¹¹⁾.

Dari hasil perhitungan kekritisan dan distribusi fluks neutron keempat model teras tersebut di atas maka akan diperoleh satu model teras yang memenuhi syarat keselamatan dan paling ideal sebagai teras pengganti teras reaktor TRIGA. Dari hasil kajian keselamatan reaktor dari keempat model teras dapat dipilih yang paling sesuai sebagai pengganti teras reaktor Kartini baik dari keselamatan, ekonomi maupun teknis.

METODOLOGI

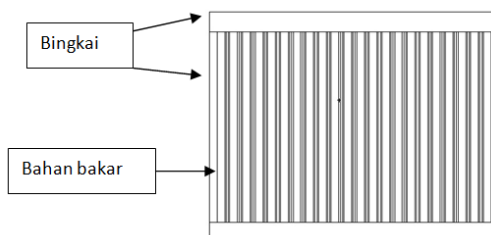
Peralatan dalam melaksanakan kegiatan ini digunakan Laptop atau Personal Komputer dan Paket Program MCNP4c ⁽¹²⁾. Keselamatan reaktor dapat diketahui dari nilai-nilai parameter reaktor dalam teras, dalam hal ini adalah fluks neutron dan faktor perlipatan neutron efektif. Besarnya fluks neutron berbanding lurus dengan daya yang dibangkitkan. Salah satu syarat keselamatan reaktor yang harus dipenuhi adalah bahwa dalam teras tidak ada titik panas yang melampaui batas yang diijinkan. Hal tersebut dapat diperoleh jika nilai perbandingan daya maksimum disuatu titik/daerah dengan daya rerata terasnya (F_r) dan rerata aksialnya (F_z) ⁽¹³⁾. Perkalian F_r dan F_z tersebut dikenal dengan nilai faktor puncak daya atau titik terpanas. Indikator tingkat keselamatan dalam kondisi *shut-down* dapat diketahui dari nilai faktor perlipatan neutron efektif dalam kondisi semua penyerap/batang kendali di dalam teras. Dalam kondisi tersebut maka nilai faktor perlipatan neutron efektif harus lebih kecil 0,9. Untuk mendapatkan parameter-parameter reaktor tersebut di atas dapat diperoleh dengan perhitungan kekritisan dan distribusi fluks neutron. Perhitungan kekritisan dilakukan untuk kondisi reaktor dioperasikan, semua penyerap/batang kendali di luar dan di dalam teras. Untuk reaktor dengan penyerap/batang kendali lebih dari satu, faktor perlipatan neutron efektif dihitung untuk kondisi *shut-down* dengan 1 penyerap/batang kendali. Semua perhitungan dilakukan dengan program MCNP4C.

Data masukan diperlukan oleh Program MCNP. Data masukan terdiri dari tiga kelompok kartu, kartu sel, kartu permukaan dan kartu data. Untuk perhitungan kekritisan reaktor, data masukan terdiri dari data sel yang mendiskripsikan semua struktur teras reaktor termasuk reflektor dan pendingin didefinisikan dalam kartu sel. Kartu sel terdiri dari seluruh bagian-bagian perangkat bahan bakar, struktur teras, pendingin dan reflektor (seluruh komponen reaktor). Kartu permukaan adalah semua data yang mendefinisikan permukaan pembatas sel dari seluruh sel yang ada dalam teras. Kartu data terdiri dari beberapa kartu, kartu mode (mode n, p atau e atau k untuk kekritisan), kartu parameter sel dan permukaan (mendefinisikan tingkatan reaksi antara permukaan dengan neutron), kartu sumber (mendefinisikan posisi sumber neutron), kartu material (untuk mendefinisikan komposisi material) dan kartu *Tally* (untuk mendefinisikan hasil perhitungan yang dikehendaki, F4 untuk fluks neutron dalam sel dan F7 untuk daya yang dibangkitkan dalam sel).

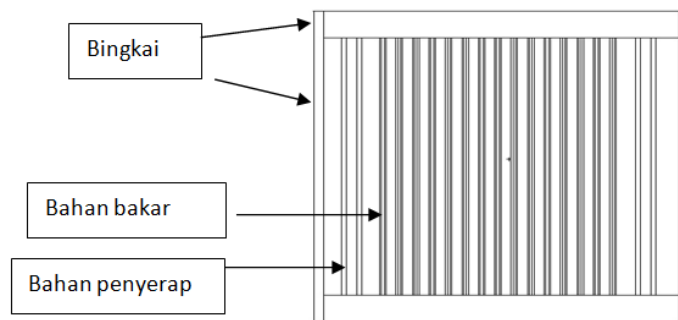
Berdasar masing-masing model teras yang telah diuraikan di atas maka dibuat data masukan MCNP. Setelah data masukan selesai ditulis kemudian dieksekusi/"RUN" dengan program MCNP Visual Editor, untuk menguji apakah data masukan sudah benar. Jika sudah benar maka diskripsi teras reaktor yang tertulis dalam data akan dapat ditampilkan. Jika ada kesalahan maka dalam tampilan akan ada garis putus-putus pada bagian yang salah, dan jika kesalahannya fatal maka program MCNP Visual Editor akan berhenti dan harus mengakhiri program. Data masukan harus diperbaiki sampai dapat menghasilkan gambar yang benar sesuai data masukan, hal itu menunjukkan bahwa data masukan benar dan kemudian dapat di "RUN" dengan program MCNP untuk perhitungan kekritisan dan perhitungan fluks neutron.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses eksekusi program MCNP Visual Edition diperoleh visualisasi dari teras reaktor yang dirancang. Dalam penelitian ini perangkat bahan bakar dan perangkat bahan bakar-kendali untuk konfigurasi model Reaktor Uji Material disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Perangkat bahan bakar dan perangkat bahan-bakar- kendali keduanya sama dalam bentuk kotak ukuran $6,4 \times 7,5 \times 70$ cm.



Gambar 1. Perangkat bahan bakar.



Gambar 2. Perangkat bahan bakar-kendali.

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat bahan bakar dan bahan bakar-kendali.

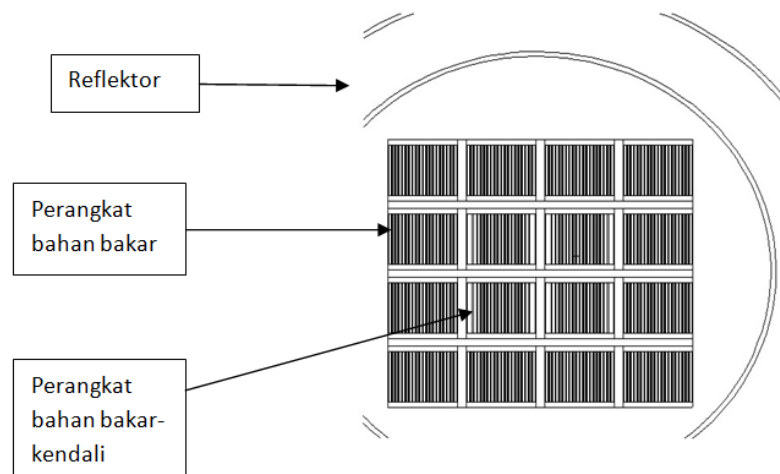
No.	Uraian	Ukuran
1.	Tebal Kelongsong Al	0.0375 cm
2.	Tebal Daging U3Si2-Al	0,055 cm
3.	Pengayaan U235	19.75%
4.	Densitas Uranium	4,8 grU/cm ³
5.	Celah antara dua plat	0,2 cm
6.	Tinggi plat bahan bakar	50 cm
7.	Lebar plat bahan bakar	5,35 cm
8.	Bingkai perangkat bahan bakar/perangkat bahan bakar-kendali	Tebal 0,55 dan 0,2 cm, tinggi 60 cm
9.	Bahan penyerap B4C	0,4 cm

Model teras dengan konfigurasi Reaktor Uji Material disajikan pada Gambar 3 dan distribusi fluks neutron rerata masing-masing perangkat bahan bakar disajikan pada Gambar 4. Hasil perhitungan nilai faktor perlipatan neutron efektif (k_{ef}) pada berbagai kondisi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan kritikalitas model teras konfigurasi Reaktor Uji Material.

No.	Kondisi penyerap	Nilai k_{ef}
1.	Semua penyerap di luar teras	1,0521
2.	Semua penyerap di dalam teras	0,5394
3.	Dua di luar teras satu di atur	0,99
4.	Dua di luar teras satu di dalam teras	0,9241
5.	Pendingin air diganti udara	0,1441

Dari hasil perhitungan fluks neutron diperoleh fluks neutron maksimum dan rerata teras masing-masing adalah $5,4584 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ dan $3,7888 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, sehingga faktor puncak daya radial (F_r) 1,4512. Untuk nilai faktor puncak daya aksial (F_z) 1,2216 merupakan perbandingan fluks maksimum dengan fluks neutron rerata arah aksial, maka faktor puncak daya total adalah 1,7729. Secara keseluruhan distribusi fluks neutron rerata untuk masing-masing perangkat bahan bakar untuk kondisi operasi reaktor disajikan pada Gambar 4. Dalam kondisi operasi maka FAC5 dan FAC9 ditarik seluruhnya dari teras sedangkan FAC6 dan FAC8 ditarik sebagian dari teras sampai diperoleh kondisi kritis ($k_{ef} = 0,99$).

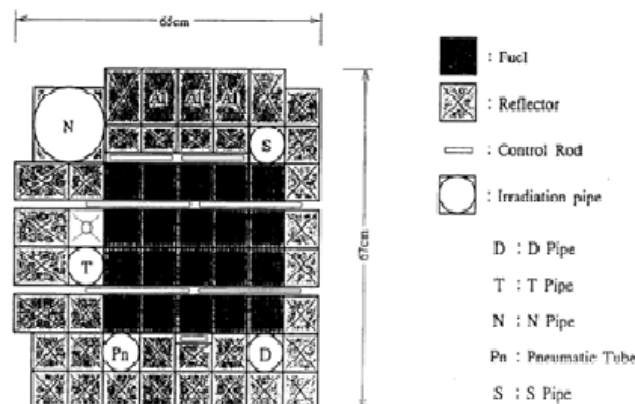


Gambar 3. Model Teras Reaktor Uji Material.

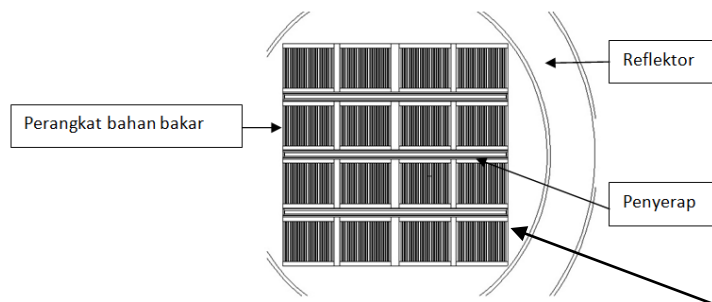
FA1 $3,2033 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA2 $4,0090 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA3 $3,9192 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA13 $3,1322 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA4 $4,0798 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FAC5 $5,1412 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FAC6 $4,9074 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA14 $3,9821 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA7 $4,0133 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FAC8 $4,9290 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FAC9 $5,1750 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA15 $4,1132 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA10 $3,1799 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA11 $3,9016 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA12 $4,0187 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA16 $3,2298 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Gambar 4. Distribusi fluks neutron rerata pada perangkat bahan bakar untuk konfigurasi teras model Reaktor Uji Material pada kondisi operasi.

Model teras lainnya yang dikaji adalah model teras adalah seperti model Reaktor Riset Jepang-4 (JRR-4) ⁽⁹⁾ seperti pada Gambar 5. Namun pada konfigurasi teras kompak dalam penelitian ini, penyerap disisipkan di antara dua kelompok perangkat bahan bakar seperti disajikan pada Gambar 6. Dalam model teras tersebut selain lebar penyerap sama dengan lebar teras (Gambar 6) juga dipelajari konfigurasi teras dengan lebar penyerap sama dengan lebar setengah teras (sama dengan lebar dua perangkat bahan bakar) seperti disajikan pada Gambar 8.



Gambar 5. Konfigurasi Teras Japan Research Reactor-4 (JRR-4) ⁽⁹⁾.

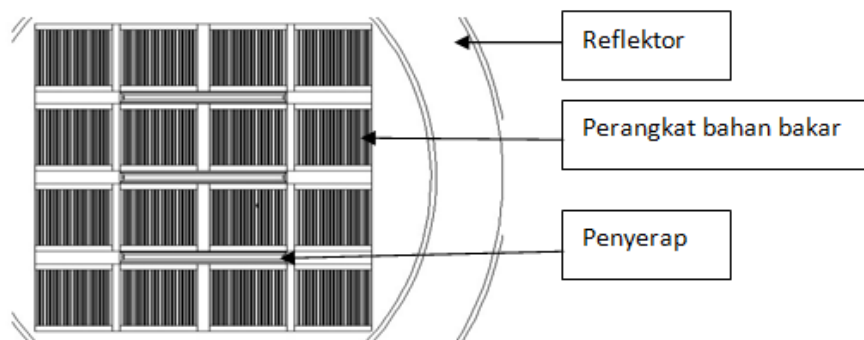


Gambar 6. Model Teras JRR-4 penyerap dengan lebar sama dengan lebar teras reaktor.

Dari perhitungan kritikalitas untuk berbagai kondisi seperti model teras sebelumnya diperoleh hasil nilai faktor perlipatan neutron efektif seperti pada Tabel 3. Hasil perhitungan fluks neutron diperoleh fluks neutron maksimum dan rerata teras masing-masing adalah $5,7973 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ dan $3,3821 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, sehingga faktor puncak daya radial (F_r) 1,5089. Untuk nilai faktor puncak daya aksial (F_z) 1,2216 merupakan perbandingan fluks maksimum dengan fluks neutron rerata arah aksial, maka faktor puncak daya total adalah 1,8433.

FA1 $2,7926 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA2 $3,6844 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA3 $3,7131 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA13 $2,8516 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA4 $3,7136 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA5 $4,8952 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA6 $4,9527 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA14 $3,7363 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA7 $3,6747 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA8 $4,9150 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA9 $5,2482 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA15 $3,7691 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA10 $2,8559 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA11 $3,8408 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA12 $3,8978 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA16- $2,9326 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Gambar 7. Distribusi fluks rerata perangkat bahan bakar dengan penyerap lebarnya sama dengan lebar teras (teras model JRR4) pada kondisi operasi.



Gambar 8. Model Teras JRR-4 penyerap dengan lebar setengah teras.

Tabel 3. Hasil perhitungan kritikalitas model teras konfigurasi JRR-4.

No.	Kondisi penyerap	Nilai k_{ef}
1	Semua penyerap di luar teras	1,0521
2.	Semua penyerap di dalam teras	0,5394
3.	Dua di luar teras satu di atur	0,99
4.	Dua di luar teras satu di dalam teras	0,9241
5.	Pendingin air diganti udara	0,1441

Dari perhitungan kritikalitas untuk berbagai kondisi seperti model teras sebelumnya diperoleh hasil nilai faktor perlipatan neutron efektif seperti disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan kritikalitas model teras konfigurasi JRR-4.

No.	Kondisi penyerap	Nilai k_{ef}
1	Semua penyerap di luar teras	1,0521
2.	Semua penyerap di dalam teras	0,5394
3.	Dua di luar teras satu di atur	0,99
4.	Dua di luar teras satu di dalam teras	0,9241
5.	Pendingin air diganti udara	0,1441

Perhitungan distribusi fluks neutron dalam teras disajikan pada Gambar 9, dalam bentuk fluks rerata untuk masing-masing perangkat bahan bakar. Fluks neutron maksimum dan rerata dalam teras adalah $5,4995 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ dan $3,8012 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, sehingga faktor puncak daya radial (F_r) 1,4468. Untuk nilai faktor puncak daya aksial (F_z) 1,2216 merupakan perbandingan fluks maksimum dengan fluks neutron rerata arah aksial, maka faktor puncak daya total adalah 1,7674.

FA1 $2,9142 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA2 $3,5382 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA3 $3,7786 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA13 $2,9692 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
FA4 $3,7509 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA5 $4,6880 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA6 $4,7768 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA14 $3,8920 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
FA7 $3,8153 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA8 $4,7613 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA9 $5,0067 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA15 $3,9070 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
FA10 $2,9482 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA11 $3,6247 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA12 $3,6374 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	FA16 $3,0229 \times 10^{12}$ $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

Gambar 9. Distribusi fluks rerata perangkat bahan bakar dengan penyerap lebarnya sama dengan lebar dua perangkat bahan bakar (teras model JRR-4) pada kondisi operasi.

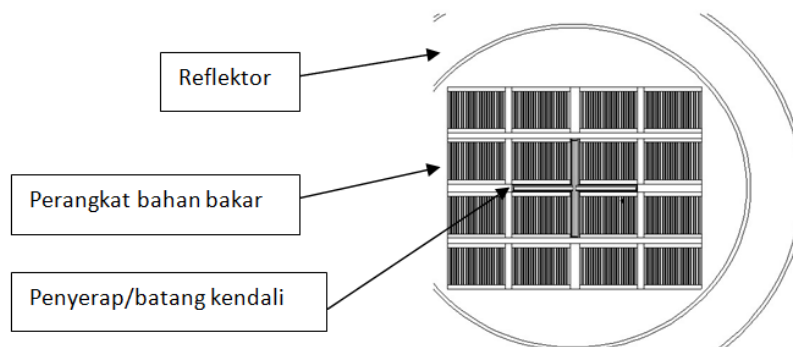
Dari perhitungan kritikalitas untuk berbagai kondisi model teras kompak di mana penyerap/batang kendali menyilang teras seperti pada Gambar 10, diperoleh hasil nilai faktor perlipatan neutron efektif seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan kritikalitas model teras konfigurasi JRR-4.

No.	Kondisi penyerap	Nilai k_{ef}
1	Semua penyerap di luar teras	1,05197
2.	Semua penyerap di dalam teras	0,8599
3.	Dua di luar teras satu di atur	1,0005
4.	Dua di luar teras satu di dalam teras	0,98
5.	Pendingin air diganti udara	0,1572

Perhitungan distribusi fluks neutron dalam teras disajikan pada Gambar 10, dalam bentuk fluks rerata untuk masing-masing perangkat bahan bakar. Fluks neutron maksimum dan rerata dalam teras adalah $5,2328 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ dan $3,8826 \times 10^{12} \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$, sehingga faktor puncak daya radial (F_r) 1,3478. Untuk nilai faktor puncak daya aksial (F_z) 1,2216 merupakan perbandingan fluks maksimum dengan fluks neutron rerata arah aksial, maka faktor puncak daya total adalah 1,6465.

Dilihat dari karakteristik fluks neutron dari beberapa model teras hampir semuanya mempunyai karakteristik fluks neutron yang sama, fluks neutron tertinggi berada pada empat perangkat bahan bakar yang berada di tengah. Oleh karena fluks neutron dihitung dengan program MCNP hasilnya tidak simetri 100% seperti kalau hasil hitungan analitik atau perhitungan dengan metode numerik seperti hasil perhitungan dengan program CITATION; di mana fluks disuatu titik dengan titik lainnya saling gayut, sedang untuk MCNP masing-masing titik dihitung sendiri-sendiri berdasar kebolehan neutron melintas pada titik tersebut, sehingga antara titik satu dengan lainnya tidak gayut.



Gambar 10. Teras kompak.

FA1 $2.9730 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA2 $3.7859 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA3 $3.9154 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA13 $3.1419 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA4 $3.7371 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA5 $4.5129 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA6 $4.6698 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA14 $3.9571 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA7 $3.8168 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA8 $4.5911 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA9 $4.9057 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA15 $3.9912 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
FA10 $3.0545 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA11 $3.9270 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA12 $4.0499 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	FA16 $3.2200 \cdot 10^{12}$ $n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Gambar 11. Distribusi fluks rerata perangkat bahan bakar untuk konfigurasi teras kompak pada kondisi operasi.

Berdasar perhitungan faktor puncak daya reaktor dari berbagai model teras dengan bahan bakar plat U_3Si_2-Al sebagai alternatif pengganti teras reaktor Kartini, pada prinsipnya memenuhi syarat keselamatan operasi reaktor⁽¹³⁾. Hal tersebut dapat dilihat dari nilai faktor nuklir dari semua model teras tidak lebih besar dari 2. Karakteristik fluks neutron dari beberapa model menunjukkan adanya kesamaan antara model teras satu dengan lainnya. Dari segi nilainya fluks neutron dalam teras lebih besar dari pada fluks neutron yang dihasilkan oleh reaktor TRIGA (lebih besar 1,5 – 2 kalinya). Sehingga fluks neutron di fasilitas iradiasi juga akan lebih besar dari sebelumnya.

Dari hasil perhitungan faktor perlipatan neutron efektif dengan kondisi *shutdown* dengan satu penyerap pada tiga model konfigurasi teras diperoleh nilai 0,96 - 0,98 yang menunjukkan tingkat subkritik. Hal tersebut menunjukkan bahwa reaktor dalam kondisi darurat dapat dipadamkan dengan satu penyerap. Dengan demikian tidak ada keraguan tentang keselamatan reaktor jika ada satu penyerap/batang kendali gagal dimasukkan ke dalam teras.

Nilai faktor perlipatan neutron efektif dengan kondisi kehilangan air pendingin sehingga udara sebagai pendinginnya maka memberikan nilai 0,1441 - 0,1572, hal tersebut menunjukkan tingkat subkritik yang sangat tinggi, sehingga jika pada kondisi operasi dengan nilai faktor perlipatan neutron efektif satu, tiba-tiba pendingin hilang maka secara seponatan nilai faktor perlipatan neutron efektifnya berubah menjadi 0,14 - 0,15 yang berarti reaktor langsung mati tanpa batang kendali masuk dalam teras.

Dari beberapa model teras yang telah dipelajari karakteristiknya, model JRR4 dengan penyerap yang lebarnya sama dua perangkat bahan bakar merupakan alternatif model teras pengganti teras reaktor Kartini yang paling cocok. Hal tersebut dikarenakan paling memungkinkan untuk konstruksi, terutama dalam instalasi penyerap. Teras model konfigurasi JRR4 bahan penyerap/ batang kendali berbentuk plat ditempatkan di sela-sela antara

dua kelompok perangkat bahan, sehingga motor dari ketiga penggerak batang kendali dapat ditempatkan pada jembatan di atas teras reaktor TRIGA.

KESIMPULAN

Berdasar hasil kajian keselamatan reaktor melalui perhitungan parameter-parameter reaktor yang terkait dengan keselamatan reaktor dari beberapa model konfigurasi teras reaktor berbahan bakar plat U_3Si_2-Al diperoleh hasil yang tidak jauh berbeda antara satu model dengan model lainnya. Nilai faktor daya puncak berkisar antara 1,64 - 1,84, dan nilai faktor perlipatan neutron efektif dengan penyerap dalam teras antara 0,53 - 0,85. Dari keempat konfigurasi teras yang paling cocok sebagai pengganti teras reaktor Kartini adalah konfigurasi teras model JRR-4 dengan penyerap berupa plat dengan lebar setengah lebar teras reaktor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Kepala Sub Bidang Akuntansi Bahan Nuklir dan Perencanaan Dekomisioning, selaku penanggungjawab kegiatan yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. M. AZIZ and M. HASSAN, *Arab Journal of Nuclear Science and Applications*, 46(4), (2013) 182 - 188
2. VAN DEN BERGHER Sven, *Advances in Science and Technology* Vol. 73, (2010) 78 - 90
3. K NEAMATI, N M SHARIFLOO, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3(2s), (2013) 260 - 263
4. R.O.R. MUNIZ, D.B. DOMINGOS, A. SANTOS, A.T. e SILVA, T.G. JOSE, V.O. ARIDES, *International Nuclear Alliance Conference - INAC 2013 Reafe PE Brazil*, November 24-29, (2013)
5. S.X. ZHONG, N. KEN, U. HIRONOBU, M. KAICHIRO, *Journal Article Annals of Nuclear Energy*, 62, Elsevier Ltd, (2013) 195 - 201
6. VILARINO, A. DOVAL, *Project Report INVAP's Research Designs*, Hindawi Publishing Corporation, *Science and Technology of Nuclear Installations*, Article ID 490391, Vol. (2011) 1 - 6
7. VILARINO, *Core Improvement Performance Using U_3Si_2-Al Fuel in the RP-10 Modernization*, *Proceeding 2011-33rd International Meeting Reduced Enrichment for Research and Test Reactor*, Marriot Santiago Hotel, Santiago, Chile October 23-27, (2011)
8. A. ROHRMOSER, W PETRY, *Fuel Plate Temperature during Operation of FRM II*, *Proceeding Research Reactor Fuel Management 2009 Transaction*, Vienna, Austria, 22-25 March (2009)
9. M.C. ANSELMET, P. LEMOINE, D. IRACANE, E. KOONEN, P. BENOIT, I. CAILUERE, P. COLOMB, T. PIN, S. BRISSON, S. GUILOT, *Qualification Program for JHR Fuel Element*, *Proceeding Research Reactor Fuel Management 2009 Transaction*, Vienna, Austria, 22-25 March (2009)
10. H. NAGADOMI, S. WATANABE, Y. FUNAYAMA, T. NAKAJIMA, K. KEIDA, *Performance Test of JRR4 LEU Core*, *Proceeding International Meeting on Reduced Enrichment of Research and Test Reactor*, Sao Paulo, Brazil, October 18-23, (1998)
11. P.J.M. THIJSEN, *HEU/LEU Conversion Of The PETTEN HFR*, *Proceeding Research Reactor Fuel Management 2006 Transaction*, 10th International Meeting Research Reactor Management, Sofia Bulgaria, 30 April-30 May (2006)
12. LA-12625-M, *Version 4B Manual*, MCNP- A General Monte Carlo N- Particle Transport Code, Los Alamos National Laboratory, March (1997)
13. LEWIS EE, *Nuclear Power Reactor Safety*, JOHN WILEY and SONS. Inc, New York, (1977)