

## ANALISIS KEKRITISAN TERAS REAKTOR NUKLIR CEPAT DAN TERMAL TERKOPEL BERDASARKAN PADA LETAK SUMBER NEUTRONNYA

Mohamad Ali Shafii<sup>1,4</sup>, Ade Gaffar Abdullah<sup>2,4</sup>, Menik Ariani<sup>3,4</sup>, S. H. J. Tongkukut<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Padang, Sumatera Barat

<sup>2</sup>Kelompok Bidang Keahlian Komputasi Sistem Tenaga Listrik, Program Studi Pendidikan Teknik Elektro FPTK UPI, Jl. Dr. Setiabudhi 207 Bandung 40152

<sup>3</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Sriwijaya, Kampus Indralaya, Ogan Ilir, Sumatera Selatan

<sup>4</sup>Laboratorium Fisika Nuklir FMIPA Insitut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung

<sup>5</sup>Jurusan Fisika FMIPA Universitas Sam Ratulangi Manado Sulawesi Utara

E-mail: [mashafii70@yahoo.com](mailto:mashafii70@yahoo.com)

### ABSTRAK

Telah dirancang teras reaktor nuklir cepat dan termal terkopel dengan tujuan untuk mempelajari perilaku jejak produksi fisi neutron berdasarkan pada letak sumber neutron yang ditempatkan dalam teras reaktor cepat, termal maupun keduanya dengan melihat kekritisan sistem yang terkopel menggunakan kode komputer MVP-2.0. Teras reaktor cepat ditempatkan di pusat sistem dikelilingi oleh teras reaktor termal, di antara kedua teras ditempatkan penyerap panas. Sistem ditinjau dalam dua kasus, berdasarkan pada ukuran geometri desainnya. Pada kasus pertama diperoleh hasil bahwa kedua teras reaktor yang terkopel menjadi reaktor superkritik, namun pada kasus kedua menunjukkan bahwa sistem berada pada kondisi subkritik. Hasilnya penelitian ini cukup signifikan untuk bisa menjadi pertimbangan dalam penelitian lebih lanjut.

**Kata kunci** : teras reaktor, reaktor cepat, reaktor thermal.

### ABSTRACT

*The coupled fast and thermal reactor core has been designed with the aim to study the behavior of production neutron fission track length based on the neutron source is placed in the fast, thermal or both cores by viewing of the criticality of coupled system using the MVP-2.0 code. Fast core that placed in the center of coupled system is surrounded by thermal core, between thermal and fast core is placed thermal absorber. The coupled system is considered in two cases, based on the size of the design geometry. In the first case, the result is obtained that both cores of the coupled system becomes supercritical, but the second case shows that the coupled system is in the subcritical condition. The results are quite significant to be able to become a consideration in the further research.*

*Keyword* : reactor core, fast reactor, thermal reactor.

## I. PENDAHULUAN

Saat ini penelitian dan pengembangan berbagai jenis reaktor nuklir generasi IV memerlukan kajian teoritis dan komputasi dalam mendesain reaktor nuklir. Tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan keselamatan nuklir, meminimalisasi limbah, pemanfaatan sumber daya alam, dan mengurangi biaya membangun dan pengoperasian pembangkit listrik. Reaktor nuklir generasi IV ini diharapkan mulai beroperasi pada tahun 2030.

Desain reaktor terkopel antara reaktor cepat dan reaktor termal sangat menantang untuk dikembangkan dan digunakan secara komersial di masa depan. Ide pokoknya adalah menggabungkan dua jenis berdasarkan klasifikasi reaksi nuklir. Kebanyakan reaktor nuklir untuk keperluan komersial berdasarkan pada reaksi fisi nuklir. Reaktor nuklir tersebut biasanya menggunakan uranium sebagai bahan bakar, namun penggunaan thorium juga sedang banyak digunakan. Reaktor fisi dapat dibagi

menjadi dua klasifikasi yang tergantung pada energi neutron yang digunakan untuk mempertahankan reaksi fisi berantai yaitu : reaktor termal dan reaktor cepat.

Reaktor termal menggunakan neutron lambat atau termal. Sebagian besar reaktor daya menggunakan jenis ini. Reaktor jenis ini ditandai dengan adanya bahan moderator, yaitu neutron diperlambat sampai energi neutron mendekati energi kinetik rata-rata dari partikel sekitarnya, atau sampai neutronnya tertermalkan. Neutron termal memiliki kemungkinan memfisikan uranium-235 jauh lebih tinggi. Selain moderator, reaktor termal juga memiliki bahan bakar yang dapat berfisi, bejana bertekanan, pelindung, dan instrumen untuk memantau dan mengontrol sistem reaktor.

Reaktor cepat menggunakan neutron cepat untuk mempertahankan reaksi fisi berantai. Reaktor ini dicirikan oleh ketiadaan bahan moderator. Untuk memulai reaksi berantai membutuhkan uranium yang diperkaya atau pengkayaan dengan plutonium 239, karena proses fisi U-235 kemungkinannya lebih rendah dibandingkan dengan neutron yang dimoderasi pada reaktor termal. Reaktor cepat memiliki potensi untuk menghasilkan limbah lebih sedikit karena semua aktinida melakukan fisi dengan neutron cepat, namun lebih sulit dan lebih mahal untuk mengoperasikannya. Untuk itu, studi awal untuk menggabungkan kedua tipe reaktor ini menjadi kajian yang sangat menarik.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem reaktor terkopel telah dikembangkan di dalam reaktor RB di Beograd yang disebut sistem HERBE yang dimulai pada tahun 1988 (Pesic, 1991). Tujuannya adalah untuk merancang teras reaktor terkopel sefleksibel mungkin untuk mensimulasikan spektrum neutron dari beragam reaktor cepat. Bahan bakar nuklir yang ada harus digunakan dengan modifikasi sistem reaktor seminimum mungkin. Sistem HERBE terdiri dari teras reaktor cepat terkopel dengan uranium alam, zona filter, konverter neutron, D<sub>2</sub>O sebagai reflektor dalam, teras reaktor termal, dan air berat sebagai reflektor luar.

Dalam kinetika reaktor, teori dan percobaan yang digunakan untuk mempelajari neutronik dan dinamika dari sistem yang terkopel terdiri dari reaktor cepat dan modul subkritis termal telah dikembangkan di *Institute of Physics and Power Engineering (IPPE)* Rusia (Kurkharchuk, et al., 2000). Kinetika sistem reaktor terkopel ditentukan oleh tingkat interaksi antara komponen-komponen dari sistem dan secara substansial dapat berbeda dari pada kinetika reaktor standar.

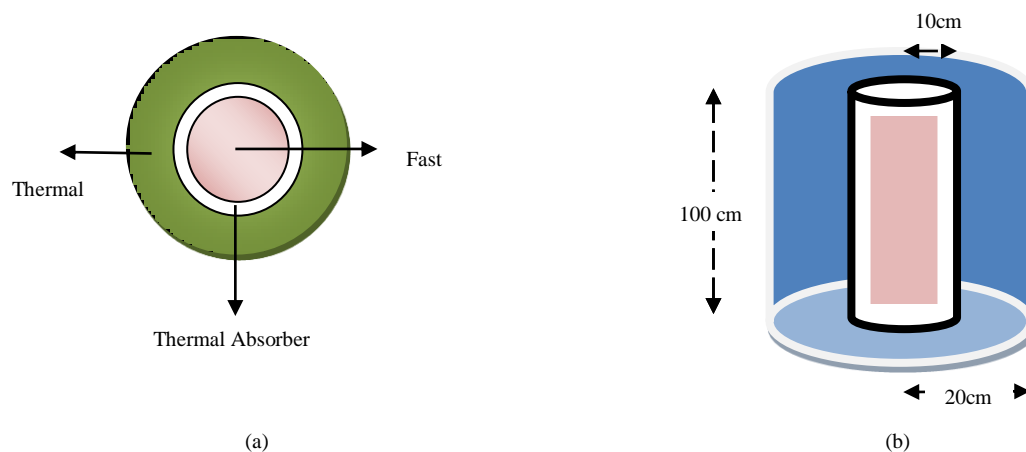
Dalam penelitian ini, model khusus reaktor terkopel diselidiki untuk melacak proses transport fisi neutron menggunakan metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo dapat secara efektif digunakan untuk perhitungan parameter neutronik dalam sistem teras reaktor terkopel jenis reaktor cepat dan termal. Sebagai contoh, analisis reaktor nuklir terkopel dengan nuklir yang dipompa laser (*nuclear-pumped laser*) NPL yang terdiri dari reaktor pulsa dengan uranium yang diperkaya sedikit dan modul laser subkritis menggunakan metode Monte Carlo diselidiki oleh Takezawa, dkk. (2008). Dalam sistem ini, energi yang dilepaskan dalam teras reaktor untuk sistem tanpa reflektor eksternal sangat tergantung pada tingkat input reaktivitas ke dalam teras. Hal ini terjadi karena sistem dengan dinding moderator internal memiliki kopling neutron yang lemah, dan karena itu, karakteristik fisik reaktor pulsa (reaktor cepat) untuk sistem tersebut mirip dengan reaktor tanpa modul subkritis. Hal ini menunjukkan bahwa parameter reaktor pulsa dari sistem terkopel tergantung pada kopling neutron antar komponen. Perhitungan faktor multiplikasi efektif berdasarkan pada ekspansi termal

ketika suhu teras naik dalam NPL juga telah dikembangkan (Obara dan Takezawa, 2008).

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, dalam penelitian ini, perancangan sistem reaktor terkopel sederhana dalam teras reaktor cepat dan termal dilakukan untuk mendeteksi perilaku panjang jejak transport neutron ketika terjadi proses fisi neutron dengan menempatkan letak berbagai sumber neutron diselidiki dengan kode computer MVP-2.0 di Department of Nuclear Engineering, Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology Japan.

### III. METODOLOGI

Desain geometri teras reaktor nuklir cepat dan termal terkopel terlihat pada Gambar 1a and 1b. Komposisi material penyusun sistem reaktor nuklir terkopel terlihat pada Tabel 1.



**Gambar 1a.** Tampak muka dan tampak samping (1b) teras reaktor terkopel

Dalam sistem ini, di setiap daerah teras reaktor cepat dan termal diasumsikan telah terjadi homogenisasi untuk semua komposisi material. Teras reaktor cepat dan termal disusun dari 80% Uranium alam dan 20% Plutonium, artinya sistem ini tidak membutuhkan pengkayaan. Bahan bakar reaktor dilapisi oleh material 10% SUS sebagai kelongsong (*cladding*). Material SUS tersusun atas komposisi isotop seperti Cr, Fe, Ni dan Mo. Dalam teras reaktor cepat, bahan bakar MOX 70% dipilih untuk mendapatkan proses fisi lebih banyak, untuk itu diperlukan Natrium sebagai pendingin (*coolant*). Dalam beberapa tipe reaktor, pendingin juga bertindak sebagai moderator neutron. Jika pendingin adalah moderator, maka perubahan suhu dapat mempengaruhi masa jenis pendingin / moderator dan mempengaruhi perubahan daya output. Sebuah pendingin suhu yang lebih tinggi akan kurang padat, dan karena itu kurang efektif sebagai moderator. Dalam tipe reaktor lain pendingin bertindak sebagai penyerap dengan menyerap neutron seperti halnya cara kerja batang kendali.

**Tabel 1 Komposisi material sistem reaktor terkopel**

Daerah	Material Komposisi	Komposisi Bahan Bakar
Fast	Fuel MOX(70%), SUS sebagai cladding (10%), Sodium Sebagai coolant (20%)	U238 80% Pu239 20%
Thermal	Fuel MOX (10%) SUS sebagai cladding (10%) H2O sebagai moderator (80%)	U238 80% Pu239 20%
Thermal Absorber	Boron Carbide (B <sub>4</sub> C)	

Dalam teras reaktor termal, komposisi bahan bakar MOX turun hingga 10%, seperti halnya dengan SUS sebagai kelongsong (*cladding*), tapi komposisi moderator meningkat hingga 80%. Material moderator mengurangi kecepatan neutron cepat menjadi termal dengan kecepatan rendah. Antara teras reaktor cepat dan termal ditempatkan penyerap termal (*neutron filter*). Penyerap neutron adalah isotop dari unsur-unsur tertentu yang menyerap neutron bebas menciptakan isotop yang lebih berat dari unsur yang sama. Neutron filter ini terbuat dari material penyerap neutron termal di zona sempit dengan variasi ketebalan dari 0,5 cm sampai 1,0 cm. Material dengan boron karbida (B4C) telah diuji dalam perhitungan sebagai material yang memungkinkan untuk bertindak sebagai filter neutron (Pesic, dkk 1991). Komposisi yang tepat dan lebar dari zona neutron filter tergantung dari spektrum neutron yang diinginkan dalam teras reaktor cepat.

Sistem reaktor terkopel cepat-termal diselidiki dalam dua kasus berdasarkan pada ukuran geometri teras. Untuk setiap ukuran geometri, ada dua kasus letak sumber neutron yang ditinjau yaitu sumber neutron yang ditempatkan teras reaktor cepat saja, dan teras termal saja. Ukuran dan jenis kasus ditunjukkan pada Tabel 2a dan 2b.

**Tabel 2a. Ukuran geometri teras reaktor pada kasus 1**

Region	Inner Radius (cm)	Outer Radius (cm)	Height (cm)
Fast	0.0	20.0	200.0
Thermal	21.0	80.0	200.0
Thermal Absorber	20.0	21.0	200.0

**Tabel 2b. Ukuran geometri teras reaktor pada kasus 2**

Region	Inner Radius (cm)	Outer Radius (cm)	Height (cm)
Fast	0.0	10.0	100.0
Thermal	10.5	40.0	100.0
Thermal Absorber	10.0	10.5	100.0

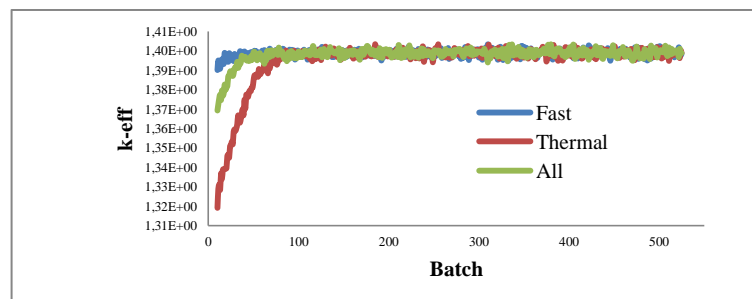
Semua perhitungan dilakukan menggunakan kode computer Monte Carlo MVP 2.0 untuk neutron energi kontinyu dengan data nuklir JENDL-3.3 (Nagaya et al., 2005).

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter analisis kekritisian pada teras reaktor terkopel cepat dan termal menggunakan kode MVP-2.0 ditunjukkan dalam tabel 3.

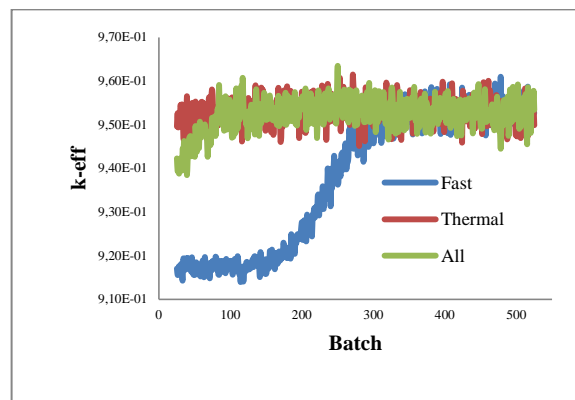
**Table 3. Parameter Perhitungan  $k_{eff}$**

Number of history per batch	200000
Number of batch (skip +tally)	500+25
Number of group energy	70
Neutron track length	production
Boundary condition	Outer void



**Gambar 2. Panjang jejak neutron pada produksi neutron untuk kasus 1.**

Gambar 2 menunjukkan bahwa, panjang jejak neutron pada proses produksi neutron dimulai dengan besarnya nilai  $k$ -eff yang berbeda sebelum mencapai 100 batch. Setelah itu,  $k$ -eff mempunyai nilai yang tetap sama sampai mencapai konvergen. Dalam kasus ini, panjang jejak neutron pada proses produksi neutron untuk sistem reaktor terkopel cepat-termal cenderung berada pada keadaan super kritis. Ketika sumber neutron ditempatkan dalam teras reaktor cepat atau termal,  $k$ -eff tidak menunjukkan perubahan yang signifikan setelah panjang jejak neutron mencapai kondisi stabil di 100 batch. Kondisi ini terjadi karena ketebalan penyerap termal yang hanya 1,0 cm tidak sebanding dengan ukuran dari geometri teras sistem yang mempunyai diameter luar 160 cm dan tinggi 200 cm. Selain itu tingkat fisi neutron ketika neutron sumber ditempatkan di daerah termal tertunda ketika neutron sumber ditempatkan di daerah cepat atau wilayah keduanya. Hal ini wajar, karena tingkat fisi neutron termal di daerah ini akan tertermalkan karena komposisi air sebagai moderator terlalu dominan dibandingkan dengan komposisi bahan bakar.



**Gambar 3. Panjang jejak neutron pada produksi neutron untuk kasus 2.**

Berbeda dengan kasus 1, kasus 2 menunjukkan bahwa, jika ukuran geometri dari sistem dikurangi menjadi setengah kali geometri sistem kasus 1, faktor multiplikasi  $k$ -eff reaktor terkopel cepat-termal akan berada pada tingkat subkritis, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Mula-mula panjang jejak neutron dalam proses produksi fisi neutron neutron yang sumber neutronnya ditempatkan di daerah termal dan daerah cepat-termal, memiliki  $k$ -eff sama, namun kondisi berbeda ketika sumber neutron ditempatkan di daerah cepat. Di daerah teras reaktor cepat, mula-mula  $k$ -eff berada pada kurang dari 300 batch, setelah itu kondisi mencapai kestabilan sampai konvergen.

Neutron absorber cukup mampu untuk menyerap laju neutron fisi karena sumber neutron ditempatkan dalam teras reaktor cepat. Ketebalan penyerap termal yang hanya 0,5 cm masih dapat ditembus dengan laju fisi neutron. Namun, diperlukan waktu yang lama sampai kondisi tertermalkan. Karena ukuran geometri teras reaktor cepat lebih kecil, sedangkan komposisi bahan bakar MOX dan pendingin tidak berubah, maka laju reaksi fisi neutron sebenarnya adalah lebih cepat. Namun, ketebalan penyerap neutron mampu menyerap neutron sangat baik, sehingga fisi neutron menjadi lambat. Oleh karena itu, ketika sumber neutron ditempatkan di daerah cepat dari sistem terkopel, fisi neutron tertunda untuk sementara waktu, kemudian menjadi stabil dan bersatu bersama ketika sumber neutron diletakkan pada daerah termal. Sayangnya, kondisi ini terjadi pada keadaan subkritis, hal ini berarti bahwa ada kemungkinan terjadi kebocoran neutron.

## V. KESIMPULAN

Perhitungan analisis kekritisan teras reaktor terkopel cepat dan termal menggunakan kode komputer MVP-2.0 untuk dua kasus dengan ukuran geometri teras yang berbeda, telah memberikan hasil yang berbeda. Penempatan sumber neutron di setiap teras reaktor berdampak pada kemampuan fisi neutron menembus penyerap termal. Ketebalan penyerap termal tidak hanya menyebabkan sistem terkopel akan menjadi kritis atau subkritis, tetapi juga sistem ini layak terkopel atau tidak. Selain itu, perubahan ukuran diameter masing-masing teras juga memberikan pengaruh banyak pada kemampuan fisi neutron dalam menentukan sistem kekritisan. Keseimbangan komposisi bahan bakar, kelongsong dan pendingin di teras reaktor cepat dan komposisi bahan bakar, kelongsong dan moderator di teras reaktor termal akan menentukan kekritisan suatu reaktor terkopel yang diinginkan.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih untuk Prof. Obara dan Prof. Sekimoto yang mengizinkan penulis melakukan penelitian di Obara Lab. Tokyo Institute of Technology, Jepang dari bulan Oktober 2008-Januari 2009 tentang topik ini, serta atas kebaikan hati Prof. Zaki Su'ud.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

- Kukharchuk, O.F., et al. (2000), Coupled Fast-Thermal Reaktor Sistem: Theory and Experiment, Proc. Intern. Topical Meeting PHYSOR 2000
- Obara, T. and Takezawa, H., et al. (2008), Pulse Reaktor Sistem for Nuclear-Pumped Laser using Low-Enriched Uranium, *Energy Conversion and Management* (49) p.1892-1897
- Nagaya, Y., et al. (2005), *MVP/GMVP II: General Purpose Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and MultiGroup Methods*, JAERI 1348
- Pesic, M., et al. (1991), A Study on Criticality of Coupled Fast-Thermal Core Herbe at RB Reaktor, *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 18, No.7, pp.413-420
- Takezawa, H., et al. (2008), Criticality Analysis of Pulse Core and Laser Module Coupled Small Reaktor with Low Enriched Uranium, *Progress in Nuclear Energy* (50) p.304-307