

Analisis dan Uji Kinerja Operasi Reaktor Kartini Sebagai Sumber Neutron Fasilitas Eksperimen SAMOP

(masuk/received 27 Juli 2017, diterima/accepted 15 Januari 2018)

The Analysis and Performance Test of Kartini Reactor Operation to Provide Neutron Source of SAMOP

Argo Satrio Wicaksono, Syarip

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator -BATAN

Jl. Babarsari, Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281

argosw@batan.go.id, syarip@batan.go.id

Abstrak – Telah dilakukan analisis dan uji kinerja operasi reaktor Kartini dalam rangka menyediakan sumber neutron untuk fasilitas eksperimen SAMOP (Subcritical Assembly for ^{99}Mo Production). Metode yang digunakan adalah dengan melakukan rekonfigurasi teras, perhitungan ulang parameter operasi reaktor seperti reaktivitas total bahan bakar, reaktivitas lebih teras, reaktivitas batang-batang kendali, suhu pendingin, dan sebagainya. Reaktor dioperasikan secara bertahap mulai 20 jam, 50 jam dan 100 jam pada daya 100 kW dan parameter operasi diamati. Digunakan perangkat lunak TRIGA-MCNP untuk perhitungan reaktivitas reaktor dan konfigurasi teras agar mencapai kondisi kritis. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa teras reaktor Kartini akan kritis pada konfigurasi teras berisi 65 elemen bakar, yang ekuivalen dengan 2470 gram masa ^{235}U . Untuk menambah reaktivitas lebih, teras reaktor Kartini dimuati dengan 71 elemen bakar. Hasil analisis dan uji kinerja menunjukkan bahwa reaktor Kartini dapat dioperasikan 100 jam secara kontinu dan berdasar pengamatan, parameter-parameter operasi reaktor berada di bawah nilai batas kondisi operasi (BKO) yang telah ditetapkan. Dapat disimpulkan bahwa reaktor Kartini siap menyediakan sumber neutron melayani eksperimen produksi isotop dengan metode SAMOP.

Kata kunci: uji kinerja, operasi, reaktor Kartini, SAMOP, TRIGA-MCNP

Abstract – The analysis and performance test of Kartini reactor operation to provide neutron source of SAMOP (Subcritical Assembly for ^{99}Mo Production) experimental facility have been done. The used method was recalculation the operating parameters such as reactivity of fuels, core excess reactivity, control rod worth, coolant temperature were and reactor core configuration. The reactor was operated step by step from 20 hours, 50 hours and 100 hours, and reactor parameters were monitored. The criticality calculation using TRIGA-MCNP was done to determine the core configuration in such that the critical mass was achieved. The results of TRIGA-MCNP calculations shows that Kartini reactor core will be critical with core configurations contain 65 fuel elements, which is equivalent to 2470 grams ^{235}U mass. The Kartini reactor core was then loaded by 71 fuel elements to increase the core excess. The analysis and operating performance test result shows that Kartini reactor can be operated 100 hours continuously and safely, reactor operation parameters are all belows the limit operating conditions (LCO). It can be concluded that Kartini reactor is ready to provide neutron source for SAMOP experimental facility for isotope production.

Keywords: performance test, operation, Kartini reactor, SAMOP, TRIGA-MCNP

I. PENDAHULUAN

Reaktor Kartini selama ini dioperasikan pada jam kerja dengan periode operasi rata-rata sekitar 5-6 jam setiap harinya. Reaktivitas lebih (*core excess*) reaktor Kartini sangat terbatas, mengingat keterbatasan jumlah bahan bakar yang tersedia, oleh karena itu reaktor Kartini hanya dioperasikan pada hari (jam) kerja jika ada permohonan dari pengguna. Untuk melayani permohonan operasi kontinu misalnya 2×24 jam, masih memungkinkan, tetapi jika lebih lama lagi reaktivitas lebihnya tidak mencukupi. Pada tahun 2016 ada permohonan operasi reaktor selama 100 jam secara kontinu dalam rangka penyediaan sumber neutron bagi fasilitas eksperimen produksi isotop dengan metode SAMOP (*Subcritical Assembly for ^{99}Mo Production*). Fasilitas eksperimen SAMOP direncanakan

menggunakan sumber neutron dari *beamport* radial reaktor Kartini dengan *requirement* fluks neutron berorde $10^6 - 10^7$ neutron $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ dalam waktu 100 jam [1,2]. Fluks neutron pada *beamport* radial tersebut adalah berdasarkan perhitungan secara teoritik yang dilakukan menggunakan simulasi [3].

Oleh karena itu diperlukan pengujian terhadap kinerja operasi reaktor selama 100 jam tersebut untuk meyakinkan semua parameter operasi berada dalam batas kondisi operasi (BKO) yang dipersyaratkan. Pelaksanaan operasi reaktor Kartini 100 jam kontinu dilakukan secara bertahap yaitu melalui ujicoba operasi 20 jam, 50 jam, dan akhirnya 100 jam. Hal ini dilakukan mengingat sudah lama sekali reaktor Kartini tidak dioperasikan secara kontinu dalam jangka waktu yang panjang. Berdasarkan evaluasi terhadap pelaksanaan operasi 20 jam

dan 50 jam secara kontinyu ternyata diperlukan tindak lanjut untuk memastikan reaktor Kartini dapat digunakan dengan selamat untuk operasi 100 jam. Prioritas utama dalam tindak lanjut ini adalah aspek keselamatan teras reaktor. Tindak lanjut yang telah dilakukan yakni penambahan bahan bakar sekaligus rekonfigurasi teras reaktor. Kegiatan wajib yang melekat setelah dilakukan penambahan bahan bakar adalah kalibrasi batang kendali reaktor dan kalibrasi daya. Berdasarkan data yang diperoleh dari rangkaian kalibrasi ini adalah reaktor Kartini telah siap digunakan untuk operasi 100 jam.

Parameter yang menjadi perhatian utama adalah suhu air tangki reaktor, suhu bahan bakar, posisi batang kendali serta paparan radiasi yang timbul. Parameter maksimal yang terukur selama operasi masih dalam batas BKO yang tercantum dalam laporan analisis keselamatan reaktor Kartini revisi 7 tahun 2012 [7].

Reaktor Kartini selama ini telah banyak digunakan untuk pendidikan dan pelatihan, untuk teknik analisis nuklir, dan sebagai sarana *Nuclear Training Centre* [8,9]. Diharapkan dengan dapat direalisasikannya sumber neutron dari *beamport* untuk fasilitas eksperimen SAMOP dapat semakin meningkatkan dayaguna reaktor Kartini.

II. LANDASAN TEORI

Pengoperasian reaktor nuklir pada prinsipnya adalah melakukan pengendalian proses reaksi pembelahan inti yang terjadi di dalam reaktor. Proses pengoperasian reaktor meliputi *start-up* dari kondisi subkritik sampai pada tingkat daya yang ditentukan, kemudian menaikkan dan mempertahankan daya reaktor pada tingkat daya tertentu, dan menurunkan, menghentikan atau mematikan operasi reaktor. Sarana untuk pengoperasian reaktor adalah sistem instrumentasi dan pengendalian. Instrumentasi untuk pengukuran fluks neutron mempunyai waktu tanggap yang lebih cepat dibanding dengan pengukuran suhu. Oleh karena itu pada dasarnya sistem pengendalian reaktor terdiri dari sistem pengukuran atau instrumentasi parameter fisis reaktor terutama fluks neutron, dan sistem penggerak batang-batang kendali.

Kekritisitas adalah proses di mana reaksi pembelahan inti berantai di dalam teras reaktor nuklir dapat berlangsung secara terus-menerus tanpa ada sumber neutron luar. Persamaan kekritisitas berdasar teori satu kelompok energi neutron termodifikasi, dan dikaitkan dengan keberadaan batang kendali, dinyatakan sebagai [4]

$$k_0 = \frac{k_{\infty}}{1 + B_0^2 M^2} \tag{1}$$

$$k = \frac{k_{\infty}}{1 + B^2 M^2} \tag{2}$$

Persamaan (1) untuk kondisi sebelum batang kendali disisipkan dan persamaan (2) batang kendali disisipkan ke dalam teras reaktor. Parameter k_0 dan k masing-masing adalah faktor perlipatan neutron atau tingkat kekritisitas reaktor sebelum dan sesudah batang kendali disisipkan. B^2 dan B_0^2 masing-masing adalah *buckling* dari reaktor

sesudah dan sebelum batang kendali disisipkan. $M^2 = L^2 + \tau$ adalah luas migrasi termal, dengan L^2 luas difusi dan τ umur Fermi.

Reaktivitas reaktor (ρ) dinyatakan sebagai

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \tag{3}$$

dan reaktivitas batang kendali (*rod worth*) dinyatakan sebagai

$$\rho_w = \frac{k_0 - k}{k} = \frac{(B^2 - B_0^2) M^2}{1 - B_0^2 M^2} \tag{4}$$

Buckling reaktor selain fungsi geometri reaktor juga sebagai fungsi bahan bakar reaktor. Untuk reaktor Kartini geometrinya sudah *fixed* sehingga *buckling* akan berubah dengan berubahnya posisi batang-batang kendali secara aksial dan jumlah bahan bakar, yaitu meliputi *burn-up* dan konfigurasi bahan bakar di dalam teras reaktor. Oleh karena itu parameter-parameter fisis tersebut harus dihitung dan diamati selama pengoperasian reaktor. Demikian pula parameter operasi lainnya seperti suhu bahan bakar, suhu dan laju aliran pendingin, paparan radiasi di atas *deck* reaktor, dan sebagainya.

III. METODE PENELITIAN

Metode analisis dan uji kinerja yang digunakan adalah dengan melakukan rekonfigurasi teras, perhitungan ulang parameter-parameter operasi reaktor seperti reaktivitas total bahan bakar, reaktivitas lebih teras, reaktivitas batang-batang kendali, suhu pendingin, dan lain sebagainya. Nilai kekritisitas suatu teras reaktor dapat dihitung dengan metode Monte Carlo dengan bantuan perangkat lunak MCNP (*Monte Carlo N-Particle*). MCNP adalah *software* berbasis Monte Carlo yang dibuat oleh Tim Monte Carlo dari Laboratorium Nasional Los Alamos, USA dan diaplikasikan untuk mensimulasikan perjalanan partikel neutron, foton, dan elektron dalam material tiga dimensi mulai dari partikel atau foton itu “lahir” kemudian berinteraksi dengan material hingga berakhir di daerah “mati” [5]. MCNP dapat digunakan untuk memecahkan persoalan transpor partikel di dalam bahan berbentuk tiga dimensi sembarang. Program ini mampu menghitung *eigenvalue k* atau k_{eff} yaitu faktor perlipatan neutron efektif seperti yang dijelaskan pada persamaan (1) dan (2) dalam suatu sistem bahan dapat belah dengan akurasi tinggi [4].

Perhitungan reaktivitas reaktor dilakukan dengan bantuan perangkat lunak TRIGA-MCNP. Perangkat lunak tersebut memiliki kemampuan untuk menyusun konfigurasi teras reaktor jenis TRIGA sekaligus membangkitkan *input* untuk MCNP (*Monte Carlo N-Particle*). TRIGA-MCNP adalah program serbaguna yang dikembangkan oleh Putranto Ilham Yazid [6] untuk pemodelan perhitungan besaran reaktor TRIGA Mark II dengan menggunakan kode MCNP (Versi 4A atau lebih tinggi).

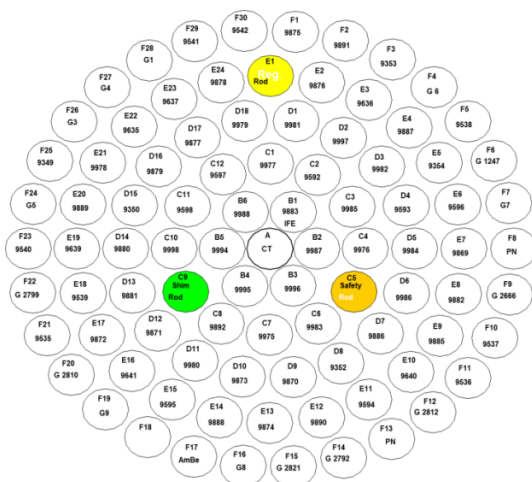
Selanjutnya reaktor dioperasikan secara bertahap mulai 20 jam, 50 jam dan 100 jam dan dilakukan pengamatan parameter-parameter operasi reaktor seperti

posisi batang kendali, suhu pendingin air tangki reaktor (ATR), suhu masuk dan keluar penukar panas (HE), daya reaktor, dan sebagainya. Dilakukan perhitungan dan analisis kinerja operasi apakah parameter-parameter operasi reaktor tersebut masih berada pada batas kondisi operasi (BKO) yang telah ditetapkan seperti yang tercantum di dalam Laporan Analisis Keselamatan (LAK) reaktor Kartini [7]

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan rekonfigurasi awal menggunakan TRIGA-MCNP adalah reaktor Kartini baru dapat mencapai kondisi kritis saat teras telah terisi oleh 65 elemen bakar dan ketiga batang kendali semua pada posisi up 100%. Bahan bakar sejumlah 65 buah tersebut ekuivalen dengan 2470 gram ^{235}U . Konfigurasi seperti itu akan menghasilkan nilai $k_{\text{eff}} = 1,00076$ dengan standar deviasi 0,00076. Program TRIGA MCNP dijalankan dengan mengatur jumlah *cycle* sebanyak 100 kali, jumlah ini akan berpengaruh pada keauratan nilai k_{eff} yang diperoleh.

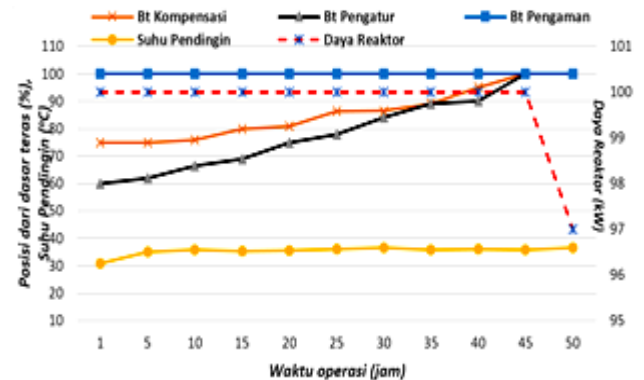
Selanjutnya teras reaktor Kartini dimuati dengan total 69 elemen bakar yang terdistribusi pada 6 buah pada ring B, 10 buah pada ring C, ring D terdapat 18 elemen bakar, 23 elemen bakar pada ring E dan 12 buah elemen bakar pada ring F, dan 15 elemen *dummy* (grafit) pada ring F. Hasil konfigurasi berdasar simulasi dengan MCNP ini sangat bersesuaian dengan hasil perhitungan pada reaktor sejenis [10-12]. Konfigurasi teras sebelum eksperimen uji operasi 100 jam kontinyu, disajikan pada Gambar 1. Hal ini juga sudah dilaporkan sebelumnya oleh penulis [13].



Gambar 1. Konfigurasi teras reaktor Kartini sebelum operasi 20 jam dan 50 jam kontinyu [13].

Hasil uji kinerja operasi reaktor Kartini tahap pertama adalah operasi 20 jam secara kontinyu, berjalan lancar dan selamat, tidak terjadi gangguan *scram*. Selama operasi reaktor 20 jam, semua parameter berada dalam rentang BKO yang diizinkan. Secara alamiah reaktivitas lebih teras (parameter untuk mempertahankan reaktor tetap kritis pada daya tertentu) terus menurun dikarenakan peracunan xenon. Selama 20 jam peracunan xenon yang

muncul yaitu reaktivitas negatif sebesar 14 sen yang diketahui dari kenaikan batang kendali kompensasi dan 5 sen dari kenaikan batang kendali pengatur, sehingga total kenaikan reaktivitas adalah 19 sen. Satuan reaktivitas adalah bilangan biasa seperti yang ditunjukkan oleh korelasi pada persamaan (1) atau dalam satuan “*dollar*” (\$) yaitu bilangan biasa dibagi dengan parameter fraksi neutron kasip efektif dari reaktor (β_{eff}), untuk reaktor Kartini $\beta_{\text{eff}} = 0,0069$ atau dalam satuan sen yaitu 0,01\$.



Gambar 2. Posisi batang-batang kendali sebagai fungsi waktu operasi pada daya 100 kW.

Hasil evaluasi operasi 50 jam, pada akhir operasi semua batang kendali pada posisi 100%. Tepatnya pada jam ke 45 setelah operasi, semua batang kendali sudah mencapai 100%, yang artinya daya reaktor sudah tidak dapat dinaikkan lagi jika terjadi penurunan daya. Maka 2 jam terakhir menjelang *shutdown*, reaktor hanya mampu kritis pada daya 97 kW, data parameter operasi dapat dilihat pada Gambar 2. Keadaan ini menjadi bagus dari sisi keselamatan karena tidak akan mungkin lagi reaktor mengalami kenaikan daya melebihi BKO. Namun sebaliknya dari sisi produktivitas, maka keadaan ini menunjukkan kekurangan bahan bakar, sehingga diperlukan penambahan bahan bakar untuk tetap mempertahankan kekritisan reaktor pada daya 100 kW dalam jangka waktu yang lebih lama.

Keputusan penambahan bahan bakar memerlukan dukungan analisis reaktivitas lebih teras terlebih dahulu dengan simulasi. Pada kondisi awal, yakni sebelum penambahan bahan bakar, reaktivitas lebih teras pada waktu reaktor berdaya 100 kW adalah sekitar 45 sen. Pada jam ke 45 dari kritis awal, sesuai prediksi maka peracunan xenon mencapai puncaknya.

Berdasarkan kenaikan semua batang kendali pada posisi 100%, dapat disimpulkan besarnya peracunan xenon adalah sebesar 45 sen. Agar reaktor dapat dioperasikan di atas 50 jam dan digunakan untuk iradiasi sampel maka diperlukan minimal 45 sen tambahan reaktivitas.

Reaktivitas teras dapat ditambahkan dengan penambahan bahan bakar ataupun rekonfigurasi teras atau kombinasi antara penambahan bahan bakar dan rekonfigurasi teras. Berdasarkan hasil perhitungan simulasi dengan TRIGA-MCNP, dengan penambahan 2 buah bahan bakar dan rekonfigurasi 3 posisi bahan bakar akan menambah reaktivitas sebesar 130 sen. Setelah

dilakukan rekonfigurasi teras kemudian dilakukan kalibrasi batang kendali, hasilnya menunjukkan hanya terjadi penambahan reaktivitas sebesar 58 sen. Walaupun antara hasil simulasi dan eksperimen terpaut jauh namun secara kenyataan bahwa telah ada penambahan reaktivitas diatas 45 sen untuk mengatasi peracunan xenon. Sehingga reaktor telah siap dioperasikan diatas 100 jam.

Pelaksanaan operasi reaktor pada daya 100 kW selama 100 jam nonstop dimulai pada tanggal 13 September 2016. Reaktor mulai kritis pada pukul 9.15 dan shutdown setelah kurang lebih 100 jam beroperasi pada tanggal 17 September 2016 pukul 14.00 WIB. Selama pelaksanaan operasi 100 jam tersebut, operator selalu mengamati parameter reaktor yang menjadi batasan kondisi operasi (BKO) dan memastikan masih dalam batas yang diizinkan. Parameter yang menjadi perhatian utama adalah suhu air tangki reaktor, suhu bahan bakar, posisi batang kendali serta paparan radiasi yang timbul. Parameter maksimal yang terukur selama operasi masih dalam batas BKO seperti yang tertuang pada LAK reaktor Kartini [7].

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan uji kinerja operasi reaktor Kartini di atas menunjukkan bahwa reaktor Kartini dapat dioperasikan 100 jam secara kontinyu. Hasil pengamatan selama operasi menunjukkan bahwa parameter operasi reaktor berada di bawah nilai BKO yang telah ditetapkan. Dapat disimpulkan bahwa reaktor Kartini siap menyediakan sumber neutron melayani eksperimen produksi isotop dengan metode SAMOP. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa massa kritis minimum teras reaktor Kartini adalah pada konfigurasi teras berisi 65 elemen bakar, atau ekuivalen dengan 2470 gram masa ^{235}U . Agar dapat beroperasi 100 jam pada daya 100 kW maka reaktivitas lebih teras reaktor Kartini perlu ditambah yaitu dengan memuati teras reaktor dengan 71 elemen bakar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Kepala PSTA BATAN, Kabid Reaktor, yang telah memberikan dukungan moril maupun materil pada pelaksanaan kegiatan ini. Demikian pula kepada para operator dan supervisor reaktor Kartini, serta para petugas proteksi radiasi, atas kerjasamanya.

PUSTAKA

[1] Syarip, Laporan Akhir Insinas SAMOP, Dok. No.:RT-2016-0151, PSTA BATAN, 2016.

- [2] Syarip, Tegas Sutondo, Edi Trijono BS, Endang Susiantini, Design & Development of Subcritical Assembly for ^{99}Mo Production (SAMOP). *Proceedings 2nd International Conference on Science and Technology*, October 27-28th 2016, Yogyakarta.
- [3] Tegas Sutondo and Syarip: Beam Characteristics of Piercing and Tangential Beamports of Kartini Reactor, "Ganendra" *Journal of Nuclear Science and Technology*, Volume 17(2), 2014, pp. 83-90.
- [4] U.S. Department of Energy *DOE-HDBK-1019/2-93: DOE fundamentals Handbook Nuclear Physics and Reactor Theory*, Volume 2 of 2, 1993.
- [5] Kasmudin, Simulasi Dosis Serap Radial Sumber Iridium-192 Untuk Brakiterapi Dengan Menggunakan MCNP. *Prosiding Seminar Nasional XI SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta*. Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 15 September 2015.
- [6] Yazid Putranto Ilham, *TRIGA-MCNP Computer Code Version-9*, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Bandung, 2006.
- [7] PSTA BATAN, *Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Kartini Revisi 7*, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Yogyakarta, 2012.
- [8] Syarip, Puradwi Ismu Wahyono, Tegas Sutondo. Evaluation on the Utilization of Kartini Research Reactor for Education and Training Programs. *Proceeding of 2nd Nuclear Energy Technology Seminar*, Denpasar, 2015.
- [9] Adi Abimanyu, Syarip, Elisabeth Supriyatni, The Development of Kartini Reactor data Acquisition System to Support Nuclear Training Centre (NTC), *Proceedings of Joint International Conference: The 3rd International Conference on Nano Electronics Research and Education (3rd ICNERE) and The 8th International Conference on Electrical, Electronics, Communications, Controls and Informatics System (8th EECCIS)*. Batu, 2016.
- [10] Noble B., et al.: Experimental and MCNP5 Based Evaluation of Neutron and Gamma Flux in the Irradiation Ports of the University of Utah Research Reactor. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, Volume 27(3), 2012, pp. 222-228.
- [11] Antonio Cammi et.al.: Characterization of the TRIGA Mark II reactor full-power steady state, *Nuclear Engineering and Design* Vol. 300, 2016, pp. 308-321.
- [12] Borio di Tigliole, A., Cammi, A., Clemenza, M., Memoli, V., Pattavina, L., Previtali, E., Benchmark evaluation of reactor critical parameters and neutron fluxes distributions at zero power for the TRIGA Mark II reactor at the University of Pavia using the Monte Carlo code MCNP. *Prog. Nucl. Energy* Vol. 52, 2010, pp. 494-502.
- [13] Argo Satrio Wicaksono dan Syarip, Validasi program komputer TRIGA MCNP dengan percobaan kekritisan reaktor Kartini. *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir Pusat Sains dan Teknologi Akselerator*, Surakarta 9 Agustus 2016.