

VALIDASI PROGRAM KOMPUTER TRIGA-MCNP DENGAN PERCOBAAN KEKRITISAN REAKTOR KARTINI

Argo Satrio Wicaksono dan Syarip

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta
email: argosw@batan.go.id

ABSTRAK

VALIDASI PROGRAM KOMPUTER TRIGA-MCNP DENGAN PERCOBAAN KEKRITISAN REAKTOR KARTINI. Telah dilakukan validasi TRIGA-MCNP yaitu program komputer untuk perhitungan massa kritis minimum teras reaktor TRIGA dengan percobaan kekritisan reaktor Kartini. Prediksi yang akurat dari massa kritis minimum sangat penting untuk memuat teras reaktor sampai memiliki reaktivitas lebih teras (*core excess*) yang memadai untuk mempertahankan operasi reaktor dalam rangka pelayanan operasi kontinu jangka panjang. Perhitungan kekritisan dengan TRIGA-MCNP dilakukan sampai diketahui konfigurasi bahan bakar di dalam teras reaktor dapat memberikan massa kritis yang minimum. Berdasarkan perhitungan tersebut dapat diketahui nilai faktor perlipatan efektif (k_{ef}) dan jumlah bahan bakar yang dibutuhkan agar reaktor mencapai kondisi kritis. Hasil perhitungan simulasi dengan MCNP menunjukkan bahwa teras reaktor Kartini akan kritis pada konfigurasi teras berisi 65 elemen bakar, yang ekuivalen dengan masa kritis sebesar 2470 gram. Hasil percobaan kekritisan pada reaktor Kartini menunjukkan bahwa massa kritis minimum terukur adalah 2500 gram U-235 dengan jumlah elemen bahan bakar 65 buah. Untuk menambah *core excess*, selanjutnya teras reaktor Kartini dimuati dengan 69 elemen bakar. Hasil validasi menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil perhitungan TRIGA-MCNP dengan hasil percobaan kekritisan yaitu dengan perbedaan (ralat) 1,2%. Dapat disimpulkan bahwa program komputer TRIGA-MCNP dapat digunakan untuk memprediksi massa kritis minimum reaktor Kartini dengan cukup akurat.

Kata kunci: TRIGA-MCNP, reaktor Kartini, massa kritis, percobaan kekritisan.

ABSTRACT

RELATIONSHIP BETWEEN HCO_3^- CONCENTRATION TO WEIGHT OF C_6H_6 OF ENVIRONMENTAL ISOTOP ^{14}C ANALYSIS AND ITS RELATIONSHIP WITH SAMPLING IN THE FIELD. It has been done the groundwater sampling process of deep aquifer in Jakarta and surrounding areas for the analysis of environmental isotope ^{14}C . Groundwater sampling was preceded by calculating the concentration of HCO_3^- (bicarbonate ion) through titration in the field. The number of repetitions of sampling is determined by the concentration data of HCO_3^- which obtained. The Repetition of this sampling will determine the acquisition of a solution of C_6H_6 (benzene) during the synthesis process benzene. In the field, the sampling is done by extracting of 60 liters of water to precipitate BaCO_3 . The sampling process is repeated based on data from the bicarbonate ion concentration. The purpose of this study to determine the relationship between the concentration of HCO_3^- to the weights C_6H_6 which obtained in the analysis of environmental isotope ^{14}C and evaluate the number of repetitions of the sampling that should be done. Based on the analysis of titration in the field, shows that concentration HCO_3^- ranged between 180-600 ppm with the acquisition of benzene between 1.84 to 4.5 grams. There is a strong relationship between the concentration of HCO_3^- and C_6H_6 weights obtained in the process of synthesis of benzene with a correlation of about 0,900. This correlation can be improved by measuring the concentration of HCO_3^- in advance in the laboratory tend to be more accurate than in the field.

Keywords : TRIGA-MCNP, Kartini reactor, critical mass, criticality experiment.

PENDAHULUAN

TRIGA-MCNP adalah program komputer untuk perhitungan massa kritis reaktor jenis TRIGA Mark-II (*Training, Research and Isotope production by General Atomic*), yang dikembangkan oleh Putranto Ilham Yazid [1] dengan menggunakan paket program MCNP. Kondisi reaktor kritis merupakan keadaan dimana laju perkembangan neutron di dalam

reaktor adalah tetap. Setiap reaktor nuklir memerlukan massa bahan bakar tertentu untuk mencapai kondisi kritis, massa tersebut disebut massa kritis. Oleh karena itu validasi perhitungan kekritisan dengan program komputer TRIGA-MCNP sudah selanjutnya dilakukan dengan eksperimen.

Reaktor Kartini adalah reaktor jenis TRIGA Mark-II yang saat ini pendayagunaannya sedang dikembangkan menjadi tempat pelatihan dasar

reaktor nuklir atau bagian dari *nuclear training centre* (NTC). Percobaan Kekritisasi Reaktor merupakan salah satu topik pelatihan pada NTC tersebut. Dengan adanya program komputer TRIGA-MCNP yang tervalidasi dan sarana percobaan kekritisasi reaktor yang memadai, diharapkan dapat mendukung kegiatan pelatihan dasar reaktor nuklir.

Di lain pihak, reaktor Kartini telah melewati percobaan kekritisasi diawal waktu operasi yang pertama kalinya. Namun seiring dengan berjalannya waktu pengoperasian dan karena terdapat beberapa perubahan yang terjadi pada komposisi dan konfigurasi serta struktur reaktor, maka dilakukan kembali percobaan untuk menentukan massa kritis minimum reaktor Kartini. Percobaan tersebut sekaligus dilakukan untuk memvalidasi program komputer TRIGA-MCNP.

DASAR TEORI

Reaktor Kartini mencapai kondisi kritis untuk pertama kalinya pada 25 Januari 1979 [2]. Kondisi kritis reaktor adalah kondisi dimana populasi neutron di dalam teras reaktor tetap. Massa bahan fisil minimum yang memungkinkan reaktor mencapai kondisi kritis disebut massa kritis [3]. Kekritisasi suatu reaktor dinyatakan dengan besaran k_{ef} yaitu perbandingan jumlah neutron pada satu generasi dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya (tanpa sumber neutron dari luar). Reaktor dikatakan pada kondisi kritis apabila harga $k_{ef} = 1$ yaitu jumlah neutron pada setiap generasi adalah tetap [4].

Penentuan massa kritis dilakukan dengan penambahan populasi neutron terhadap jumlah penambahan bahan bakar kedalam teras, sedemikian rupa sehingga harga $k_{ef} = 1$. Pengukuran secara langsung dilakukan dengan mengamati signal keluaran dari detektor neutron pada setiap kali penambahan bahan bakar dengan konfigurasi dari ring D ke ring F. Untuk menjamin bahwa pemuatan teras (*loading*) benar-benar dilaksanakan secara teratur dan aman, maka sebelum dilakukan pengukuran secara langsung di laboratorium, diperlukan perhitungan neutronik dengan menggunakan simulasi program komputer TRIGA MCNP. Program tersebut memiliki kemampuan untuk menyusun konfigurasi teras reaktor jenis TRIGA sekaligus membangkitkan input untuk MCNP.

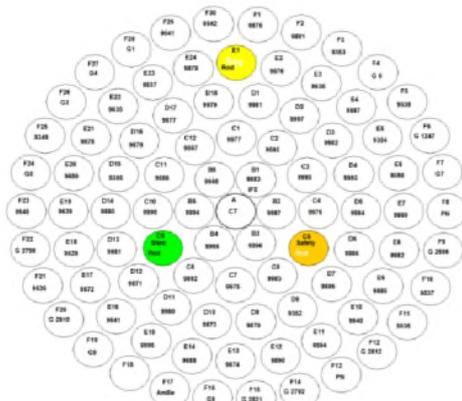
MCNP, kependekan dari *Monte Carlo N-Particle*, adalah program komputer yang dikembangkan sejak tahun 1963 di *Los Alamos National Laboratory* (LANL), Amerika Serikat [5]. Program yang digunakan dalam tulisan ini adalah versi 5 yang dikeluarkan pada tahun 2003. Program MCNP menerapkan metode Monte Carlo dalam

menyelesaikan berbagai macam persoalan transport partikel, antara lain neutron, foton, elektron, gabungan antara neutron - foton, neutron - foton - elektron maupun foton - elektron. Sifat-sifat bahan serta interaksi partikel dengan bahan dinyatakan dalam fungsi energi kontinyu. MCNP dapat digunakan untuk memecahkan persoalan transport partikel di dalam bahan berbentuk tiga dimensi sembarang. Program ini mampu menghitung *eigen value* k_{ef} dalam suatu sistem bahan dapat belah dengan akurasi tinggi [6].

TRIGA-MCNP adalah program serbaguna yang dikembangkan oleh Putranto Ilham Yazid untuk pemodelan perhitungan besaran reaktor TRIGA Mark II dengan menggunakan kode MCNP (Versi 4A atau lebih tinggi). Hal ini akan menghasilkan file input MCNP yang dapat digunakan secara langsung untuk memecahkan masalah KCODE. Sumber fisi dimodelkan dengan kartu KSRC standar, bersama dengan tabel dari titik sumber neutron fisi.

Reaktor Kartini menggunakan bahan bakar standar TRIGA tipe 104 dan tipe 204 buatan *General Atomic* sejak pertengahan tahun 1994. Bahan bakar TRIGA tipe standar 104 dan 204 yang dibuat sebelum tahun 1964 mempunyai kandungan uranium 8% dengan pengkayaan U-235 20% dengan rasio zirkonium hidrida (H/Zr) sama dengan 1. Sedangkan bahan bakar standar yang dibuat mulai dari tahun 1965 sampai sekarang mempunyai kandungan uranium 8.5%-9% dengan pengkayaan U-235 20% menggunakan campuran zirkonium hidrida dengan rasio H/Zr=1,7. Kandungan U-235 dalam tiap bahan bakar bervariasi dari 37 gram sampai dengan 39 gram dan umumnya berat U-235 dalam tiap elemen bakar adalah 38 gram. Posisi material *burnable poison* tidak tercampur homogen pada elemen bahan bakar akan tetapi tersedia sebagai cakram yang berada pada persambungan bagian bawah antara batang grafit dan batang bahan bakar. Selain itu reaktor kartini mempunyai elemen bakar tiruan yang berisi grafit terletak pada ring F. Fungsi elemen bakar *dummy* untuk menaikkan efisiensi neutron (sebagai reflektor) [7].

Konfigurasi bahan bakar reaktor Kartini pada bulan Mei 2016 adalah 67 elemen bakar 104 dan 2 elemen bakar tipe 204 yang terdistribusi dalam teras reaktor. Pengisi kolom bahan bakar yang kosong diteras diberikan elemen *dummy* sebanyak 15 batang.



Gambar 1. Konfigurasi teras reaktor Kartini bulan Mei 2016

Selain massa kritis reaktor, dikenal pula istilah jari-jari kritis. Jari-jari tersebut merupakan jari-jari teras reaktor minimum yang dibutuhkan hingga mencapai kondisi kritisnya. Dalam hal penentuan jari-jari kritis reaktor, massa kritis harus konsisten dengan rapat massa yang digunakan. Selain itu untuk setiap penambahan bahan bakar akan menyebabkan jari-jari teras juga bertambah sedangkan tinggi teras tetap. Untuk menghitung jari-jari kritis reaktor dapat menggunakan persamaan berikut [6]:

$$m_c = \pi R_c^2 H \rho \quad (1)$$

Kemudian setelah mengetahui jari-jari kritis, dapat dilakukan perhitungan pula untuk mengetahui volume kritis teras reaktor dengan cara sebagai berikut:

$$V_c = \pi \cdot R_c^2 \cdot H \quad (2)$$

- Dimana: m_c = massa kritis reaktor
 R_c = jari-jari kritis reaktor
 H = tinggi silinder reaktor
 ρ = massa jenis bahan bakar
 V_c = volume kritis reaktor

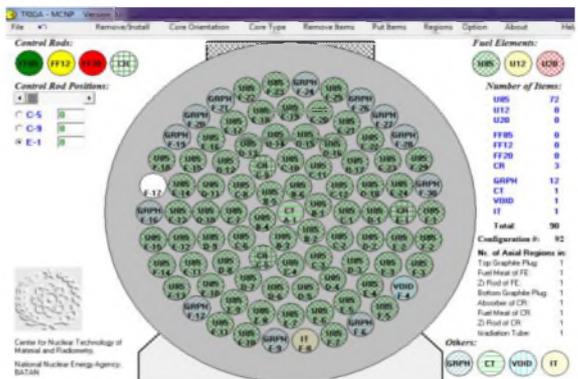
TATA KERJA

Langkah penelitian dilakukan dalam 2 tahap yang dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Pembuatan simulasi menggunakan MCNP

Simulasi dibuat untuk menentukan massa kritis pada Reaktor Kartini serta menghitung nilai k_{ef} dengan menggunakan seperangkat program TRIGA Monte Carlo N-Particle (MCNP). Seluruh komponen reaktor dan konfigurasi bahan bakar dalam program disesuaikan dengan kondisi sebenarnya pada reaktor Kartini saat ini. Kemudian dilakukan *un-loading* pada teras reaktor dengan mengeluarkan masing-masing bahan bakar yang berada pada posisi ring D4, D8, D13, D17, E5, E17, F11, dan F25. Dengan mengatur jumlah *cycle* pada program sebanyak 100 kali, kemudian dilakukan proses *loading* satu per satu

untuk diketahui nilai k_{ef} dan standar deviasi dalam setiap penambahan bahan bakar.



Gambar 2. Tampilan konfigurasi teras reaktor Kartini pada TRIGA MCNP

2. Pengukuran langsung massa kritis reaktor

Validasi dilakukan dengan mencocokkan hasil simulasi TRIGA MCNP dengan hasil pengukuran kekritisian langsung di reaktor. Dalam proses pengukuran langsung, selain reaktor Kartini sebagai obyek utama pengukuran, diperlukan beberapa peralatan tambahan seperti, sistem pencacah neutron dengan detektor CIC, *handling tool* beserta *long* tang untuk memindahkan bahan bakar dan rak untuk menempatkan bahan bakar. Langkah awal dilakukan dengan mengeluarkan masing-masing bahan bakar (sesuai dengan program simulasi MCNP) yang berada pada posisi ring D4, D8, D13, D17, E5, E17, F11 dan F25.

Sebelum melakukan *loading* bahan bakar, operator reaktor menaikkan semua batang kendali baik pengaman, kompensasi dan pengatur sampai berada pada posisi *full-up* (100%). Kemudian dilakukan pencacahan pertama kali (C1) menggunakan detektor neutron yang berada disekitar teras sebanyak 3 kali. Setelah itu petugas melakukan *loading* satu buah bahan bakar pertama dan mencatat berat massa U-235 dalam teras reaktor setelah penambahan, kemudian melakukan pencacahan kembali sebanyak 3 kali untuk diambil reratanya (C₂). Hal yang sama dilakukan untuk proses *loading* bahan bakar berikutnya dengan jumlah pencacahan yang sama sampai bahan bakar ke-n dengan cacahan C_n hingga mencapai kritis atau ditandai dengan cacahan neutron semakin bertambah dan mencapai daya reaktor pada kondisi konstan (*zero power*), atau bahkan terjadi kenaikan daya reaktor secara perlahan dan kontinu.



Gambar 3. Proses pemuatan bahan bakar ke dalam teras reaktor Kartini

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil simulasi menggunakan MCNP

Dari beberapa tahap yang telah dilakukan dalam simulasi massa kritis menggunakan program TRIGA Monte Carlo N-Particle (MCNP) diperoleh data seperti tabel berikut :

Tabel 1. Hasil simulasi massa kritis menggunakan program MCNP

Loading	Jumlah BB	m BB (gr)	k_{ef}	SD	Σm BB (gr)
-	61	2813	0,97128	0,0007	2318
D4	62	38	0,97976	0,0008	2356
D8	63	38	0,98587	0,0008	2394
D13	64	38	0,99359	0,0007	2432
D17	65	38	1,00076	0,0009	2470



Gambar 4. Hubungan antara massa bahan bakar dengan k_{ef}

Pemuatan bahan bakar reaktor (*loading*) dimulai dari ring-ring terdalam terlebih dahulu (D-E-F). Hal ini dilakukan karena reaktivitas lebih yang diberikan oleh elemen bakar pada posisi yang semakin jauh dari pusat teras akan semakin kecil. Sehingga proses pemuatan elemen bakar menuju kekritisan semakin

aman pula. Dengan menganggap bahwa elemen bakar yang dimasukkan ke dalam teras adalah semuanya dalam keadaan baru/segar dan dapat ditentukan jumlah elemen bakar maksimum yang dapat dimasukkan ke dalam teras, sehingga menjamin bahwa langkah-langkah pengisian elemen bakar selama percobaan kekritisan dilakukan dengan teratur, aman dan terkendali.

Pada simulasi ini teras reaktor Kartini diisi dengan bahan bakar TRIGA dengan kandungan fraksi uranium 8,5% dan pengayaan 20%. Dengan menganggap bahwa elemen bakar yang dimasukkan ke dalam teras adalah semuanya baru/segar maka massa disetiap elemen bakar sebesar 38 gram.

Dari hasil *running* program simulasi, reaktor Kartini baru dapat mencapai kondisi kritis saat teras telah terisi oleh 65 elemen bakar dan ketiga batang kendali semua pada posisi up 100%. Dengan kata lain diperlukan 2470 gram U-235 yang dimasukkan ke dalam teras reaktor Kartini untuk dapat mencapai kondisi kritis konfigurasi seperti itu akan menghasilkan nilai k_{ef} sebesar 1,00076 dengan standar deviasi sebesar 0,00076. Program TRIGA MCNP di jalankan dengan mengatur jumlah *cycle* sebanyak 100 kali, jumlah ini akan berpengaruh pada keakuratan nilai k_{ef} yang diperoleh. Nilai k_{ef} sendiri merupakan perhitungan jumlah rata-rata neutron fisi yang dihasilkan dalam satu generasi untuk tiap-tiap sumber neutron fisi. Satu generasi merupakan masa hidup neutron saat ia mulai dilahirkan dari reaksi fisi sampai dengan hilang karena lolos dari sistem, tangkapan parasitik, atau absorpsi yang akan menimbulkan fisi berikutnya.

2. Hasil pengukuran langsung massa kritis reaktor

Reaktor kartini memiliki jumlah bahan bakar dalam teras sebanyak 69 buah dengan total kandungan U-235 seberat 2596,960 gram. Proses *unloading* dilakukan dengan mengeluarkan delapan buah bahan bakar dari teras sehingga membuat reaktor berada pada kondisi subkritis dengan jumlah kandungan uranium tersisa dalam teras sebesar 2296,61 gram. Kedelapan buah bahan bakar tersebut diambil dan ditempatkan pada rak di sisi tangki reaktor menggunakan bantuan alat *handling tool* dan *long tang*.

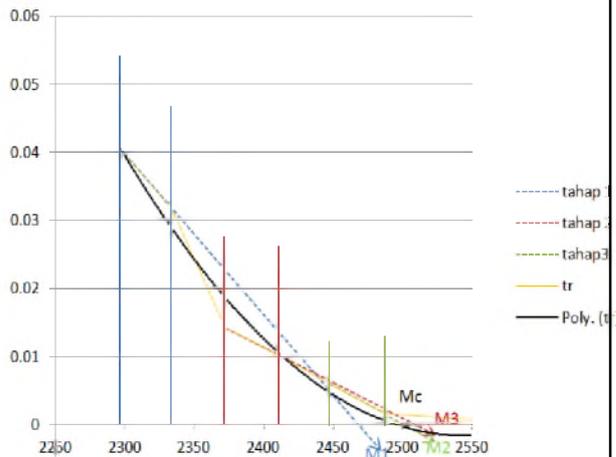
Proses pemuatan bahan bakar (*loading*) dilakukan satu per satu sampai reaktor berada pada kondisi kritisnya. Keadaan tersebut dapat diketahui dari alat pencacah yang dihubungkan pada detektor neutron sehingga menunjukkan harga 1/cacah sama dengan nol. Penambahan setiap bahan bakar pada saat proses *loading* ini akan menyebabkan perubahan besarnya fluks neutron yang dapat dihitung dari alat

pencacah. Berikut merupakan data hasil pencacahan neutron pada kondisi awal (sebelum dilakukan penambahan bahan bakar) dan setiap penambahan bahan bakar, dengan waktu pencacahan selama 1 menit (60 detik).

Tabel 2. Hasil pencacahan fluks neutron untuk setiap penambahan bahan bakar

Loading	ΣBB	Berat U-235 (gram)	Cacah rerata (cps)	1/Cacah
-	61	2296,61	24,7	0,040486
D4	62	2334,31	31,63333	0,031612
D8	63	2372,38	70,62778	0,014159
D13	64	2410,34	97,63333	0,010242
D17	65	2448,13	168,2722	0,005943
E11	66	2486,17	580,4611	0,001723
E25	67	2596,96	553937,8	1,80526E-06

Penentuan massa kritis reaktor dapat dilakukan dengan metode ekstrapolasi linier menggunakan grafik hubungan 1/C terhadap massa U-235. Berikut merupakan grafik yang diperoleh melalui percobaan kekritisan dalam setiap *loading* masing-masing bahan bakar.



Gambar 5. Grafik hubungan antara 1/C versus massa U-235

Metode ekstrapolasi dibagi menjadi tiga tahap seperti yang digambarkan pada grafik diatas. Garis biru merupakan ekstrapolasi pertama dengan dua titik data awal percobaan yang menghasilkan perkiraan massa kritis pertama (M1) sebesar 2470 gram. Tahap dua digambarkan dengan garis merah merah yang berasal dari data ke tiga dan empat yang diekstrapolasi untuk mendapatkan perkiraan massa kritis kedua (M2) sebesar 2510 gram, sedangkan garis hijau menunjukkan tahap tiga dengan ekstrapolasi data ke lima dan enam yang menghasilkan massa kritis ketiga (M3) sebesar 2500 gram.

Dari ketiga tahap ekstrapolasi tersebut dapat dibuat sebuah garis baru 'tr' dengan pendekatan *trendline* polynomial sebagai dasar penentuan masa kritis reaktor. Bila dibandingkan antara semua kurva/garis, estimasi tahap satu yang diperoleh memberikan jumlah massa kritis M1 = 2470 gram yang terlalu kecil. Sehingga dilakukan ekstrapolasi tahap kedua, dimana pada tahap ini kondisi reaktor masih belum kritis. Pada ekstrapolasi tahap tiga, reaktor telah mengalami keadaan kritis yang menghasilkan estimasi massa U-235 sebesar 2500 gram.

Estimasi tahap 3 tersebut dipilih sebagai nilai ideal dimana pada kondisi fisisnya reaktor dapat kritis setelah proses loading ke enam. Setelah itu proses *loading* dihentikan dan reaktor di *shutdown* sebelum semua bahan bakar dikembalikan keatas seperti semula. Dari hasil ekstrapolasi tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan memperbanyak tahap penambahan bahan bakar, estimasi massa kritis yang diperoleh akan semakin baik.

Massa kritis yang diperoleh dari metode ekstrapolasi linier ini kemudian dapat digunakan untuk mencari jari-jari dan volume kritis reaktor dengan persamaan (1) dan (2). Dalam persamaan tersebut terdapat rapat massa dari silinder bahan bakar yang berisi UZrH dengan kandungan U-235 sebanyak 38 gram. Rapat massa tersebut dapat diketahui dari massa UZrH dibagi volume silinder yang memiliki tinggi aktif 37 cm dan diameter 3,7 cm.

Berikut merupakan langkah perhitungan jari-jari kritis reaktor kartini:

$$\begin{aligned} \text{Massa UZrH (m)} &= 38 \text{ gram} \\ \text{Tinggi silinder (H)} &= 37 \text{ cm} \\ \text{Diameter silinder (d)} &= 3,7 \text{ cm} \\ \text{Massa Kritis (m}_k) &= 2500 \text{ gram} \end{aligned}$$

Rapat massa UZrH :

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{\pi r^2 H} = \frac{38}{3,14 \times 1,85^2 \times 37} = 0,095567 \text{ gram/cm}^3$$

Jari-jari kritis reaktor :

$$\begin{aligned} 2500 &= 3,14 \times R_c^2 \times 37 \times 0,095567 \\ R_c &= \sqrt{225,164896} = 15,005 \text{ cm} \end{aligned}$$

Volume kritis reaktor :

$$\begin{aligned} V_c &= 3,14 \times 15,005^2 \times 37 \text{ cm} \\ V_c &= 1743,2809 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Untuk memudahkan pengendalian selama operasi reaktor perlu ditambah *core excess*, 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.

KESIMPULAN

Hasil validasi menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil perhitungan TRIGA-MCNP dengan hasil percobaan kekritisan yaitu dengan perbedaan (ralat) 1,2%. Dapat disimpulkan bahwa program komputer TRIGA-MCNP dapat digunakan untuk memprediksi massa kritis minimum reaktor Kartini dengan cukup akurat. Hasil perhitungan simulasi dengan MCNP menunjukkan bahwa teras reaktor Kartini akan kritis pada konfigurasi teras berisi 65 elemen bakar, yang ekuivalen dengan masa kritis sebesar 2470 gram. Hasil pengukuran langsung dengan percobaan kekritisan menunjukkan bahwa massa kritis minimum terukur adalah 2500 gram U-235 dengan jumlah elemen bahan bakar 65 buah. Jari-jari kritis reaktor adalah 15,005 cm dan volume kritis adalah 1743,2809 cm³.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih yang kepada seluruh manajemen, supervisor, operator dan pengurus bahan nuklir reaktor Kartini yang telah banyak membantu dalam penyusunan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Yazid Putranto Ilham, *TRIGA-MCNP Computer Code Version-9*, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Bandung, 2006.
2. Subbag Dokumentasi Ilmiah, *Reaktor Kartini*, Yogyakarta, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, 2013.
3. Syarip, *Kinetika & Pengendalian Reaktor Nuklir*, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Yogyakarta, 2001.
4. Ardiwardojo, dkk, *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jakarta, 2010.
5. Yazid Putranto Ilham, *Percobaan Kekritisan Teras Reaktor TRIGA 2000 Bandung Dengan Program MCNP*, 4B, Bandung, Badan Tenaga Nuklir Nasional. 2006.
6. Syarip, *Kinetika & Pengendalian Reaktor Nuklir* Badan Tenaga Nuklir Nasional, Yogyakarta, 2001.
7. Tim penyusun LAK, *Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Kartini Revisi 7*, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, Yogyakarta, 2012.

TANYA JAWAB

Yliana Nur Azizah

– Bagaimana tipe kolam reaktor pada reaktor Kartini dan sirkulasi sistem pendingin?

Argo Satrio Wicaksono

Kolam yang digunakan pada reaktor Kartini adalah tipe kolam terbuka. Tangki reaktor terbuat dari aluminium murni setebal ± 6 mm, berbentuk silinder dengan diameter ± 200 cm dan tinggi ± 600 cm, diisi air dengan kemurnian sangat tinggi yang berfungsi sebagai moderator tambahan, pendingin, dan perisai radiasi arah vertikal. Sesuai dengan fungsinya sebagai reaktor penelitian, panas yang berasal dari teras reaktor secara ekonomis tidak dapat dimanfaatkan dan harus dibuang. Sistem pendingin reaktor terbagi menjadi sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder yang keduanya merupakan kalang tertutup. Pembuangan panas berlangsung secara konveksi alamiah ke air pendingin primer, dan air pendingin tersebut disirkulasi melalui alat penukar panas (*heat exchanger*). Kemudian pada alat penukar panas (*heat exchanger*) panas dipindahkan ke sistem sekunder yang selanjutnya dibuang ke sekeliling menara pendingin melalui kontak air dan udara. Untuk menjaga kemurnian air pada tangki reaktor tetap tinggi, baik dari radioaktivitas maupun kotoran-kotoran, maka sistem pendingin primer dilengkapi dengan sebuah demineralizer dan filter.

Hanifah Nur .S

- Bagaimana proses *loading* dan *unloading* bahan bakar pada percobaan kekritisan reaktor Kartini?
- Bagaimana bentuk fisis dan komposisi bahan bakar yang digunakan dalam reaktor Kartini?
- Dimana letak sumber neutron saat percobaan kekritisan reaktor Kartini?

Argo Satrio Wicaksono

– Proses *loading* dan *unloading* bahan bakar pada percobaan kekritisan reaktor Kartini dilakukan oleh operator dan pengurus bahan nuklir. Pelaksanaanya dilakukan secara manual dari atas kolam atau dek reaktor menggunakan peralatan *handling tools* dan *long tang*. Dalam proses *unloading*, bahan bakar satu per satu diambil dari teras reaktor kemudian ditempatkan pada rak dinding tangki reaktor. Sebaliknya, dalam proses *loading*, bahan bakar satu per satu diambil dari rak dinding tangki reaktor kemudian ditempatkan pada teras reaktor sesuai dengan konfigurasi yang diinginkan. Selama kegiatan tersebut, petugas proteksi radiasi terus mengukur dan mencatat

besarnya paparan radiasi yang timbul akibat kegiatan perpindahan bahan bakar reaktor.

– Elemen bakar reaktor Kartini terdiri dari campuran homogen uranium zirkonium hibrida (U Zr H) dalam bentuk alloy, dengan kandungan uranium sebanyak 8,5 % berat dan perkayaan U^{235} sebesar kurang dari 20 %. Bagian aktif ini berdiameter $\pm 3,5$ cm dan panjang $\pm 35,6$ cm. Pada kedua ujungnya terdapat Samarium (Sm) tipis yang berfungsi sebagai racun dapat bakar, dan juga grafit dengan diameter yang sama dan panjang

10,2 cm. Susunan ini kemudian dimasukkan ke dalam kelongsong dari stainless steel setebal $\pm 0,7$ mm, ditutup dan dilas rapat pada kedua ujungnya, membentuk suatu elemen bakar. Berat isotop U^{235} pada setiap elemen bakar sekitar 37 gram

– Sumber neutron reaktor Kartini saat ini menggunakan AmBe yang diletakkan pada posisi F17 (ring terluar teras reaktor).