

Karakterisasi Berkas Neutron dan Gamma Pada *Beamport* Reaktor TRIGA 2000

Rasito^{1,2,a)}, S. Permana^{1,b)}, dan P. Ilham Yazid^{2,c)}

¹Laboratorium Fisika Nuklir
Jurusan Fisika, Fakultas MIPA
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung

²Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan
Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jl. Tamansari No. 71 Bandung

^{a)} rasito@batan.go.id

^{b)} psidik@fi.itb.ac.id

^{c)} ilham@batan.go.id

Abstrak

telah dilakukan karakterisasi berkas neutron dan gamma di *beamport* reaktor secara simulasi menggunakan metode Monte Carlo program komputer MCNPX dan PHITS dalam rangka pengembangan fasilitas PGNAA di reaktor Triga 2000. Program MCNPX digunakan untuk mensimulasi fluks dan spektrum neutron-gamma di teras reaktor hasil reaksi fisi, sedangkan program PHITS digunakan untuk mensimulasi fluks dan spektrum neutron-gamma di *beamport* reaktor. Model geometri dan material teras reaktor serta model sumber fisi dibuat untuk input MCNPX, sedangkan model geometri dan material *beamport* serta model radiasi teras reaktor dibuat untuk input PHITS. Hasil simulasi fluks dan spektrum neutron-gamma di ujung *beamport* digunakan untuk menentukan satu dari empat *beamport* di reaktor TRIGA yang paling layak untuk fasilitas PGNAA, dengan kriteria; rasio neutron termal-cepat dan rasio neutron-gamma. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa *beamport* tangensial memiliki rasio neutron termal-cepat dan rasio neutron-gamma paling ideal sehingga lebih layak digunakan untuk fasilitas PGNAA.

Kata kunci: Berkas neutron-gamma, reaktor TRIGA, MCNPX, PHITS

PENDAHULUAN

Prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) atau disebut juga *prompt gamma activation analysis* (PGAA) merupakan salah satu teknik analisis unsur-unsur berdasarkan sinar gamma yang dipancarkan langsung dari sampel akibat interaksi dengan neutron. Dalam aplikasinya teknik ini membutuhkan sumber neutron, baik radioaktif maupun generator neutron. Salah satu sumber neutron yang dapat digunakan adalah reaktor nuklir. Fluks neutron yang cukup besar dari reaktor nuklir memungkinkan dimanfaatkan untuk PGNAA. Disamping neutron, reaktor juga menghasilkan radiasi gamma yang dapat mengganggu sistem kerja PGNAA. Fasilitas PGAA dapat dipasang pada ujung *beamport* dengan memanfaatkan berkas neutron dan mengurangi radiasi gammanya. Beberapa reaktor tipe TRIGA telah digunakan untuk fasilitas PGAA memanfaatkan *beamport*, seperti reaktor TRIGA III di Mexico dengan fluks neutron 0.7×10^8 n/cm²s dan dosis gamma 0.1 Sv/j [6]. Bahkan ada yang mendesain *beamport* tambahan yang dilewatkan air pendingin primer sebagaimana di Brazil [2]. Untuk dapat dilakukan pemanfaatan *beamport* reaktor sebagai sumber neutron bagi PGNAA maka perlu dilakukan karakterisasi fluks dan spektrum neutron dan gamma keluaran *beamport* [7], [8].

Dalam rangka utilisasi reaktor TRIGA 2000, BATAN merencanakan membangun fasilitas PGNAA memanfaatkan berkas neutron dari salah satu *beamport* reaktor. Untuk menentukan satu dari empat *beamport* yang paling layak untuk PGNAA maka perlu dilakukan penentuan spektrum neutron dan gamma keluaran *beamport*. Penentuan spektrum neutron-gamma dilakukan secara simulasi dan pengukuran. Secara simulasi dilakukan menggunakan program komputer berbasis metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo merupakan metode numerik statistik yang menyimulasikan bilangan acak untuk menyelesaikan permasalahan yang sulit secara analitik. Program komputer berbasis Monte Carlo yang digunakan untuk mensimulasi neutron-gamma di

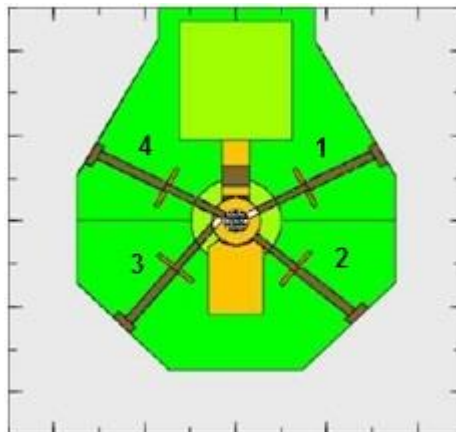
beamport reaktor adalah MCNPX dan PHITS. Program komputer MCNPX merupakan perangkat lunak komputer berbasis monte carlo yang diaplikasikan untuk menghitung perjalanan partikel neutron, foton, dan kritikalitas reaktor, dll (Pelowitz, 2008). PHITS adalah program komputer berbasis metode Monte Carlo yang dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Agency (JAEA) Jepang yang memiliki kemampuan untuk mensimulasikan perjalanan partikel neutron, foton, dll dengan rentang energi yang luas (Niita, et.al, 2006).

METODE SIMULASI

Simulasi fluks dan spektrum neutron-gamma di beamport reaktor TRIGA dilakukan menggunakan metode Monte Carlo dengan program komputer MCNPX dan PHITS. Program MCNPX digunakan untuk menentukan fluks dan spektrum neutron-gamma hasil reaksi fisi di teras reaktor. Spektrum neutron dan gamma di teras reaktor selanjutnya digunakan sebagai sumber radiasi oleh program PHITS untuk mensimulasi distribusi fluks dan spektrum neutron-gamma di beamport.

Fluks neutron-gamma di teras reaktor

Tahap pertama adalah simulasi fluks dan spektrum neutron-gamma di teras reaktor menggunakan program MCNPX. Digunakan program MCNPX ini karena telah teruji kemampuannya dalam perhitungan kritikalitas reaktor dengan dukungan dataampang lintang interaksi neutron yang sangat lengkap. Untuk menjalankan program MCNPX dibutuhkan inputan, yaitu geometri reaktor, komposisi material reaktor, model sumber radiasi, dan *tally* fluks. Reaktor TRIGA 2000 memiliki geometri yang kompleks sehingga cukup menyulitkan dalam pemodelan. Geometri reaktor yang dimodelkan meliputi teras reaktor, reflektor, dan air pendingin sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1. Bentuk dan ukuran bagian reaktor tersebut dibuat model geometri dalam input MCNPX. Data material danampang lintang dari tiap komponen reaktor juga dibuat untuk input MCNPX. Material yang digunakan adalah air, aluminium, SS 304, boron karbida, elemen bakar UZr-H, zirkonium, dan grafit.



Gambar 1. Geometri teras dan beamport reaktor TRIGA 2000.

Input MCNPX selanjutnya adalah model sumber radiasi. Radiasi di reaktor nuklir berasal dari reaksi fisi bahan bakar ^{235}U dengan neutron termal. Dalam setiap reaksi fisi satu inti ^{235}U dihasilkan energi 180 MeV sehingga untuk reaktor TRIGA 2000 yang beroperasi pada daya 2 MW maka terdapat 7×10^{16} reaksi fisi per detik. Setiap reaksi fisi akan dihasilkan rata-rata 2,5 neutron maka dalam teras reaktor terdapat $1,75 \times 10^{17}$ n/s. Untuk mendapatkan keluaran dari MCNPX yang berupa nilai fluks di teras reaktor maka dilakukan pemodelan fluks. Dalam pemodelan ini digunakan beberapa jenis *tally* diantaranya *tally* energi (E4) dan *tally* fluks untuk neutron F4:n dan foton (F4:p). *Tally* E4 merupakan bin energi yang ditentukan untuk menampilkan nilai fluks pada rentang energi tertentu. Dengan *tally* yang diberikan maka MCNPX akan memberikan hasil keluaran berupa spektrum energi neutron dan gamma (Pelowitz, 2008).

Fluks neutron-gamma di beamport

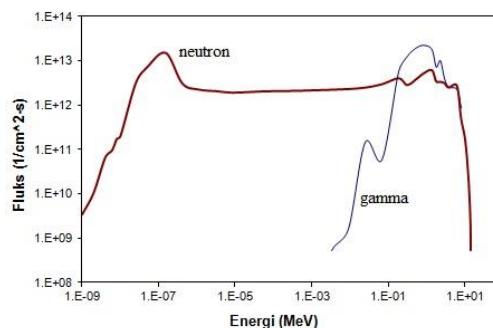
Tahap kedua adalah simulasi fluks dan spektrum neutron-gamma di beamport reaktor menggunakan program PHITS. Digunakan program PHITS karena telah teruji kemampuannya dalam perhitungan berkas partikel dan foton untuk aplikasi akselerator. Sebagaimana MCNPX, program PHITS juga memerlukan inputan, yaitu geometri beamport dan perisai radiasi dan komposisi unsurnya. Data material danampang lintang

hamburan neutron-gamma juga diinputkan, diantaranya adalah grafit, aluminium, SS 304, beton, dan udara. Sumber radiasi yang dimodelkan berupa permukaan silinder (teras reaktor) diameter 25,88 cm dan tinggi 60 cm dengan fluks dan spektrum energi keluaran simulasi MCNPX. Dalam simulasi kedua ini geometri teras reaktor diubah menjadi silinder dengan tanpa material. Untuk mendapatkan keluaran PHITS berupa distribusi fluks neutron-gamma dalam beamport dan spektrum di ujungnya diperlukan *tally t-track* dan *t-cross*. *Tally t-track* akan menghasilkan distribusi fluks neutron-gamma di beamport sesuai grid yang ditentukan, sedangkan *t-cross* menghasilkan distribusi energi pada obyek (detektor) di ujung beamport.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Reaksi fisi yang terjadi di dalam bahan bakar antara inti ^{235}U dengan neutron termal menghasilkan 2,5 neutron cepat, sinar gamma, dan inti hasil belah. Reaksi fisi berantai terjadi jika neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi pertama diperlambat hingga menjadi termal dan kemudian menumbuk inti ^{235}U yang lain, dan seterusnya. Dari peristiwa ini akan dihasilkan sejumlah neutron yang sebagiannya dilepaskan dan sebagiannya lagi ditangkap untuk keberlangsungan reaksi fisi. Jika jumlah neutron yang dihasilkan dengan neutron yang dibutuhkan mendekati sama maka reaktor nuklir dikatakan “kritis”. Distribusi fluks dan energi dari radiasi hasil reaksi fisi yaitu neutron dan gamma telah berhasil disimulasikan dengan baik menggunakan program komputer MCNPX. Program MCNPX dijalankan dalam komputer dengan processor intel core i5- 2.3 GHz, RAM 4 GB, dan sistem operasi windows 8.1. Data tampang lintang neutron yang digunakan dalam simulasi MCNPX digunakan data ENDF-VI.2, produksi gamma menggunakan NJOY, dan interaksi foto atomik menggunakan ENDF/B-VI. Dengan menggunakan spesifikasi komputer tersebut diperlukan waktu simulasi 100 menit untuk kcode 250.

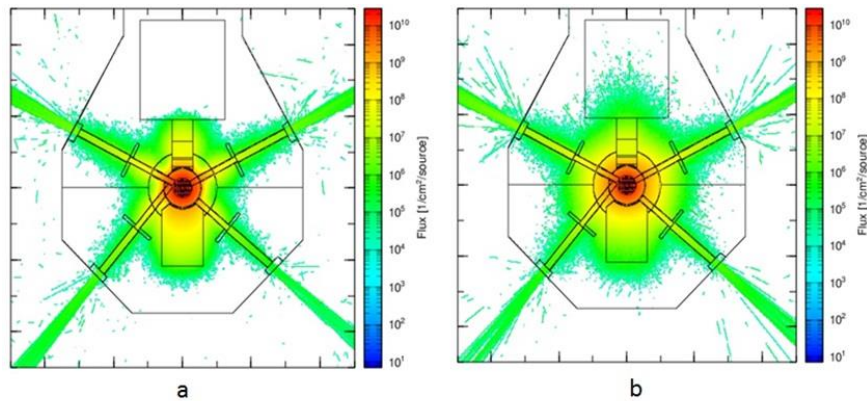
Pada Gambar 2 diperlihatkan distribusi fluks neutron dan gamma di teras reaktor hasil simulasi MCNPX. Fluks neutron dan gamma bervariasi sesuai posisi pada teras, makin ke pusat akan makin besar dengan fluks berkisar antara $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Spektrum energi neutron didominasi neutron termal ($> 5 \times 10^{-7} \text{ MeV}$) dan gamma 1 – 10 MeV. Fluks neutron di dinding teras reaktor berkisar antara $10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Hasil simulasi MCNPX berupa distribusi fluks dan energi dari neutron dan gamma ini yang selanjutnya digunakan sebagai sumber dalam simulasi distribusi fluks dan energi neutron-gamma di beamport menggunakan program PHITS.



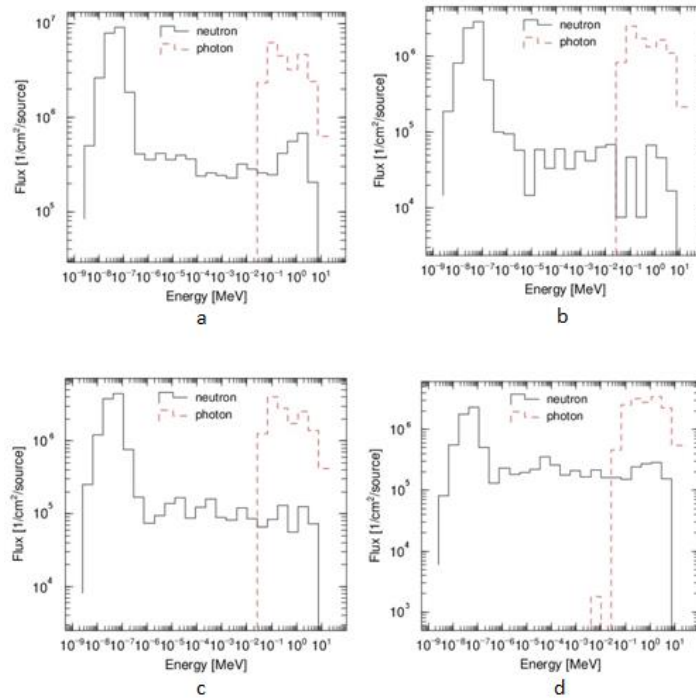
Gambar 2. Spektrum neutron-gamma di teras reaktor TRIGA.

Model sumber radiasi dengan fluks dan spektrum energi neutron- gamma yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai sumber radiasi dalam perhitungan fluks neutron dan gamma di ujung keluaran beamport. Program PHITS digunakan untuk mensimulasikan perjalanan partikel neutron dan gamma dari teras hingga di ujung beamport. Teras reaktor menghasilkan neutron dan gamma yang terpancar secara isotropik. Sebagian besar neutron dan gamma diserap dan dipantulkan oleh dinding reflektor yang berbahan karbon. Gambar 3 memperlihatkan distribusi fluks neutron dan gamma hasil simulasi PHITS. Beamport 1 memiliki bentuk radial dengan ujung berada di dinding luar reflektor dan reflektor yang dibuat berlubang. Neutron dan gamma pada beamport 1 adalah yang keluar dari teras dan melalui rongga reflektor. Beamport 2 juga memiliki bentuk radial dengan ujung depan menempel pada dinding reflektor bagian luar. Neutron dan gamma yang masuk ke dalam beamport 2 ini adalah neutron dan gamma dari teras reaktor setelah melalui reflektor. Beamport 3 memiliki bentuk tangensial dengan ujung depan berada di dalam reflektor dan dinding tabung beamport menempel pada dinding teras. Neutron dan gamma yang dalam beamport 3 merupakan neutron dan gamma dari teras reaktor dengan memanfaatkan sudut pantul dinding beamport. Geometri tangensial dimaksudkan untuk mereduksi sinar gamma dan mengoptimasi neutron. Beamport 4 memiliki bentuk radial dengan ujung depan menempel pada dinding teras dan menembus reflektor. Neutron dan gamma dalam beamport 4 adalah neutron dan gamma dari teras reaktor. Sedikit perbedaan dengan beamport 1, pada beamport 4 terdapat hamburan neutron dan gamma oleh dinding

beamport yang berbahan aluminium. Fluks neutron di ujung beamport radial 1 dan 4 adalah $10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, sedangkan di beamport tangensial 3 dan beamport radial 2 adalah $10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.



Gambar 3. Distribusi fluks dari teras hingga ujung beamport, (a) Fluks neutron, dan (b) Fluks gamma.



Gambar 4. Spektrum neutron-gamma ujung beamport.

Hasil simulasi PHITS untuk menentukan spektrum energi neutron dan gamma di ujung beamport diperlihatkan pada Gambar 4. Rasio energi neutron di beamport 1 (Gambar 4.a) adalah 7,6, beamport 2 (Gambar 4.b) adalah 21, beamport 3 (Gambar 4.c) adalah 14,4, dan beamport 4 (Gambar 4.d) adalah 3,3. Adapun rasio neutron dengan gamma untuk beamport 1 adalah 2,9, beamport 2 adalah 2,0, beamport 3 adalah 2,2, dan beamport 4 adalah 1,5.

Pemanfaatan beamport reaktor TRIGA untuk fasilitas PGNAA dapat dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa hal, diantaranya adalah tinggi fluks neutron, rasio neutron cepat dengan neutron termal, dan rendah fluks gamma. Beamport 1 dan 4 memberikan fluks neutron tinggi dengan rasio neutron termal:cepat rendah juga rasio neutron:gamma rendah. Sementara beamport 2 dan 3 memberikan rasio neutron termal:cepat yang tinggi dan rasio neutron:gamma juga tinggi. Meski rasio neutron termal:cepat di beamport 2 lebih besar namun dari sisi jumlah fluks neutron di beamport 3 lebih besar dibanding beamport 2. Dengan menggunakan rasio neutron termal:cepat dan rasio neutron:gamma maka beamport 3 (tangensial) paling ideal untuk digunakan sebagai fasilitas PGNAA. Pemilihan ujung beamport dengan pertimbangan yang menghasilkan tinggi fluks neutron dan gamma menguntungkan dari sisi semakin kecilnya waktu iradiasi sampel yang diperlukan. Namun tingginya fluks

gamma menjadikan radiasi latar menjadi besar sehingga memerlukan desain lebih pada perisai gamma untuk spektrometer. Pemilihan ujung beamport dengan pertimbangan yang rasio neutron:gamma menguntungkan dari sisi semakin kecilnya radiasi latar sehingga tidak memerlukan desain lebih pada perisai gamma untuk spektrometer meski waktu iradiasi sampel menjadi lebih lama.

KESIMPULAN

Program MCNPX telah digunakan secara baik untuk memodelkan fluks dan spektrum neutron-gamma di teras reaktor TRIGA 2000. Pada kondisi operasi daya 2 MW fluks neutron di teras reaktor berkisar $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ dengan energi neutron didominasi neutron termal ($> 5E-7 \text{ MeV}$) dan gamma energi 1 – 10 MeV. Program PHITS telah digunakan secara baik untuk memodelkan fluks dan spektrum neutron-gamma di beamport reaktor. Pada kondisi operasi daya 2 MW Fluks neutron di ujung beamport radial 1 dan 4 adalah $10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, sedangkan di beamport tangensial 3 dan beamport radial 2 adalah $10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Pemilihan ujung beamport untuk fasilitas PGNAA dengan kriteria rasio neutron termal:cepat dan rasio neutron:gamma maka beamport 3 (tangensial) menjadi alternatif pilihan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada seluruh staf dan personil bidang reaktor dan K3 PSTNT BATAN atas bantuannya sehingga kegiatan ini sehingga dapat terlaksana dengan baik.

REFERENSI

- [1] Blakeman E.D., D.E. Peplow, J.C. Wagner, B.D. Murphy, D.E. Mueller, 2007, *PWR Facility Dose Modeling Using MCNP5 and The CADIS/ADVANTG Variance-Reduction Methodology*, ORNL/TM-2007/133, Oak Ridge National Laboratory.
- [2] Bruno T Guerra, Radojko Jacimovic, Maria Angela BC Menezes, dan Alexandre S Leal, 2013, Proposed design for the PGAA facility at the TRIGA IPR-R1 research reactor, SpringerPlus, 2,:597, <http://www.springerplus.com/content/2/1/597>
- [3] Harmon C.D., Robert D.B., Judith F. Briesmeister, R.A. Forster, 1994, *Criticality Calculations with MCNPTM; A Primer*, LA-12827-M, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.
- [4] Niita, K. T. Sato, H. Iwase, H. Nose, H. Nakashima, L. Sihver, 2006, "PHITS-a particle and heavy ion transport code system," *Radiat. Meas.*, vol. 41, pp. 1080–1090,
- [5] Pelowitz, D.B., 2008, "MCNPX User's Manual Version 2.6.0", LANL, USA
- [6] Rios-Martinez, C., Paredes-Gutierrez, L., Arias, E. Alemon, Ortiz-Romero, M.E., 2001, Design of a PGAA Facility at the TRIGA Mark III of ININ, Mexico, 2001 Annual meeting; Milwaukee, WI (United States)
- [7] Sangaroon, W Ratanatongchai, R Picha, S Khaweerat, dan J. Channuie, 2017, The MCNP Simulation of a PGNAA System at TRR -1/M1, OP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 860
- [8] Sutondo Tegas, Syarip, KARAKTERISTIK BERKAS PADA *BEAM PORT* TEMBUS DAN SINGGUNG REAKTOR KARTINI, *J. Iptek Nuklir Ganendra Ganendra*, Vol. 17 No. 2: 83-90