

Desain *Beam Shaping Assembly* (BSA) berbasis D-D Neutron Generator 2,45 MeV untuk Uji Fasilitas BNCT

Desman P. Gulo¹, Suryasatriya T.¹, Slamet Santosa², dan Y. Sardjono²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga

²Pusat Sains dan Teknologi Akselerator-BATAN, Yogyakarta

192010022@student.uksw.edu

Received 08-06-2015, Revised 07-08-2015, Accepted 20-08-2015, Published 20-10-2015

ABSTRACT

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) is one of the cancer treatments that are being developed in nowadays. In order to support BNCT treatment for cancer that exists in underneath skin like breast cancer, the facility needs a generator that is able to produce epithermal neutron. One of the generator that is able to produce neutron is D-D neutron generator with 2.45 MeV energy. Based on the calculation of this paper, we found that the total production of neutron per second (neutron yield) from Neutron Generator (NG) by PSTA-BATAN Yogyakarta is 2.55×10^{11} n/s. The energy and flux that we found is in the range of quick neutron. Thus, it needs to be moderated to the level of epithermal neutron which is located in the interval energy of 1 eV to 10 KeV with 10^9 n/cm²s flux. This number is the recommendation standard from IAEA. Beam Shaping Assembly (BSA) is needed in order to moderate the quick neutron to the level of epithermal neutron. One part of BSA that has the responsibility in moderating the quick neutron to epithermal neutron is the moderator. The substance of moderator used in this paper is MgF₂ and AlF₃. The thickness of moderator has been set in in such a way by using MCNPX software in order to fulfill the standard of IAEA. As the result of optimizing BSA moderator, the data obtain epithermal flux with the total number of 4.64×10^8 n/cm²/s for both of moderators with the thickness of moderator up to 15 cm. At the end of this research, the number of epithermal flux does not follow the standard of IAEA. This is because the flux neutron that is being produced by NG is relatively small. In conclusion, the NG from PSTA-BATAN Yogyakarta is not ready to be used for the BNCT treatment facility for the underneath skin cancer like breast cancer.

Keywords: BNCT, BSA, neutron yield, epithermal neutron, MNCPIX

ABSTRAK

Salah satu terapi kanker yang sedang dikembangkan saat ini adalah metode *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT). Dalam mendukung uji fasilitas BNCT pada kanker yang berada di bawah permukaan kulit seperti kanker payudara dibutuhkan suatu generator yang dapat menghasilkan neutron epitermal. Salah satu generator yang dapat menghasilkan neutron adalah D-D neutron generator dengan energi sebesar 2,45 MeV. Dari hasil perhitungan pada makalah ini, didapatkan produksi neutron per detik (*neutron yield*) dari Neutron Generator (NG) milik PSTA-BATAN Yogyakarta sebesar $2,55 \times 10^{11}$ n/s. Energi dan fluks tersebut termasuk dalam *range* neutron cepat. Oleh sebab itu perlu dimoderasi ke level neutron epitermal yakni pada interval energi antara 1eV sampai 10KeV dengan fluks sebesar 10^9 n/cm²s. Nilai ini merupakan rekomendasi standar IAEA. Untuk memoderasi neutron cepat tersebut dibutuhkan suatu desain *Beam Shaping Assembly* (BSA) yang berfungsi untuk memoderasi neutron cepat ke level neutron epitermal. Salah satu bagian BSA yang berperan dalam memoderasi neutron cepat ke neutron epitermal adalah moderator. Pada makalah ini bahan moderator yang digunakan adalah MgF₂ dan AlF₃. Moderator tersebut diatur

Untuk tumor kanker yang berada di bawah permukaan kulit membutuhkan energi dan fluks neutron epitermal. Oleh sebab itu, langkah awal yang perlu dilakukan adalah menghitung jumlah produksi neutron per detik (*neutron yield*) dari hasil reaksi D-D neutron generator. Jika *neutron yield* yang dihasilkan berada pada batas neutron cepat, maka perlu dimoderasi hingga mencapai fluks epitermal sesuai dengan standar IAEA (lihat Tabel 1) yakni 10^9 n/cm²/s^[3,10,13,15]. Cara pengoptimasian energi dan fluks neutron dari NG ke bentuk neutron epitermal dibutuhkan sebuah *Beam Shaping Assembly* (BSA) yang terdiri dari moderator, reflektor, kolimator, dan filter^[9,15]. BSA ini berfungsi untuk mengarahkan pulsa neutron cepat dari NG ke pasien menjadi neutron epitermal. Desain BSA harus memperhatikan interaksi neutron dengan materi sehingga jumlah fluks neutron yang keluar dari BSA tepat dan tidak membahayakan pasien. Dalam pengoptimasian BSA yang perlu diperhatikan juga adalah material/bahan, ketebalan, perancangan, dan konfigurasi^[15].

Tabel 1. Rekomendasi IAEA untuk parameter BNCT^[16]

Parameter	Notasi (satuan)	Rekomendasi IAEA
Fluks neutron epitermal	$\phi_{\text{epitermal}}$ (n/cm ² s)	$> 10^9$
Rasio laju dosis neutron cepat dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_f / \phi_{\text{epitermal}}$ (Gy.cm ²)	$< 2 \times 10^{-13}$
Rasio laju dosis gamma dan fluks neutron epitermal	$\dot{D}_\gamma / \phi_{\text{epitermal}}$ (Gy.cm ²)	$< 2 \times 10^{-13}$
Rasio fluks termal dan epitermal	$\phi_{\text{termal}} / \phi_{\text{epitermal}}$	$< 0,05$
Rasio arus dan fluks epitermal	$J / \phi_{\text{epitermal}}$	$> 0,7$
Grup neutron cepat		$E > 10$ keV
Grup neutron epitermal		$1 \text{ eV} < E < 10$ keV
Grup neutron termal		$E < 1$ keV

Pada makalah ini yang akan dibahas adalah perhitungan jumlah *neutron yield* dari hasil reaksi D-D neutron generator milik PSTA-BATAN Yogyakarta dengan menganggap energi neutron yang dihasilkan dari reaksi D-D adalah 2,45 MeV serta mendesain BSA dengan pengoptimasian pada ketebalan moderator. Ketebalan moderator diatur sedemikian rupa agar dapat mencapai kriteria neutron epitermal. Pengoptimasian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Monte Carlo N Particle-X* (MCNPX) yang dapat mensimulasikan perjalanan partikel neutron suatu material dalam bentuk tiga dimensi.

METODE

A. D-d neutron generator

Salah satu perusahaan yang mengembangkan NG adalah *adelphi technology*. Generator ini menggunakan reaksi $D(d,n)^3\text{He}$. Dari reaksi fusi tersebut menghasilkan neutron kira-kira 2,45 MeV dan helium sebesar 0,82 MeV. Energi helium sebesar 0,82 MeV tidak dapat digunakan karena memiliki daya tembus yang pendek sedangkan neutron memiliki daya tembus yang panjang sehingga dapat dimanfaatkan untuk uji fasilitas BNCT. Cara kerja D-D neutron generator adalah plasma deuterium yang terbentuk di dalam sumber ion diinduksi menggunakan medan *radio frequency* (RF) dari kawat tembaga. Selanjutnya plasma diekstrak melalui lubang ekstraksi pada kolom pemercepat sehingga ion-ion dipercepat hingga ~ 120 keV^[5,14]. Dari hasil observasi, NG milik PSTA-BATAN Yogyakarta mempunyai spesifikasi energi tumbukan deutron 100-150 KeV dengan *range* arus i dari 400-900 μ a. Sebelum NG milik PSTA-BATAN Yogyakarta diuji coba pada

BNCT, terlebih dahulu dihitung jumlah *neutron yield* yang dihasilkan oleh NG PSTA-BATAN Yogyakarta dengan menggunakan Persamaan 1.

$$Y = N\sigma\phi \quad (1)$$

Y adalah *neutron yield* yang dihasilkan dari reaksi D-D(neutron/detik), n adalah jumlah inti target per luasan target, σ adalahampang lintang reaksi D-D(cm^2). Ampang lintang σ untuk interval energi tumbukan deutron 100-150 keV adalah $\pm 1 \times 10^{-26} \text{ cm}^2 - \pm 8 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$ ^[17]. ϕ merupakan jumlah rata-rata partikel penumbuk target (partikel/detik)^[11].

Dalam mendesain sistem target, ada tiga komponen penting di dalam sistem target yaitu unsur utama target (D atau T), logam penguat (Al atau Cu) dan unsur perantara (Ti). Unsur perantara ini berfungsi untuk meningkatkan produksi neutron pada suhu tertentu. Logam penguat di-*sputtering* dengan target kemudian diimplantasikan dengan target utama sehingga akan membentuk *Titanium Hydarte*^[12]. Disamping itu, ketebalan target akan menentukan seberapa besar neutron yang diproduksi setiap detiknya, sehingga Persamaan 1 dapat dijabarkan menjadi Persamaan 2.

$$dY = \sigma\phi \left(\frac{\rho N_A}{A} \right) dx \quad (2)$$

ρ adalah kerapatan Ti ($4,51 \text{ g.cm}^{-3}$), a merupakan nomor massa Ti ($47,9 \text{ g.mol}^{-1}$)^[11]. Pada makalah ini ketebalan target dx diasumsikan sebesar 0,01 cm. Besarnya ϕ ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3.

$$\phi = \frac{I}{Z} \quad (3)$$

ϕ adalah jumlah partikel keluaran per detik. I adalah arus deutron yang melewati setiap 1 deutron. Z merupakan muatan 1 deutron yaitu $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ^[11]. Hasil perhitungan *neutron yield* ditampilkan pada Tabel 3 untuk masing-masing interval energi. *Neutron yield* maksimum dihasilkan pada energi tumbukan deutron 150 keV dengan arus deutron i sebesar $900 \mu\text{a}$ yaitu $2,55 \times 10^{11} \text{ n/s}$.

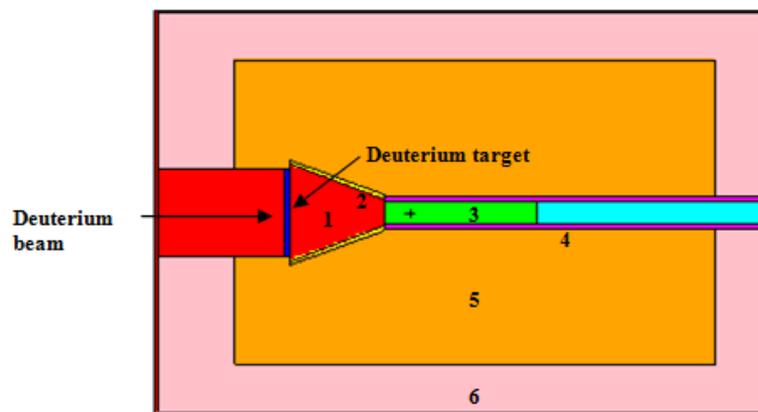
B. Moderator

Salah satu bagian BSA yang berfungsi untuk memoderasi energi dan fluks neutron cepat menjadi neutron epitermal adalah moderator. Bahan moderator harus memiliki karakteristikampang lintang hamburan yang besar untuk neutron cepat danampang lintang yang kecil untuk neutron epitermal. Parameter lain yang menentukan kualitas bahan moderator adalah nomor massa harus kecil karena moderasi neutron bisa berlangsung cepat sehingga dapat menghasilkan neutron termal. Sebaliknya, jika nomor massa besar maka neutron tidak banyak kehilangan energi setiap tumbukan pada bahan moderator. Ada beberapa bahan moderator BSA yang direkomendasi seperti Al, AlF_3 , fluental (terdiri dari senyawa campuran 1% $\text{LiF} + 30\% \text{ Al} + 69\% \text{ AlF}$), dan MgF_2 ^[10,15]. Pada makalah ini bahan moderator yang digunakan adalah MgF_2 dan AlF_3 karena kedua bahan ini memiliki harga yang terjangkau dibandingkan fluental yang sangat mahal. Pada penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa bahan AlF_3 merupakan bahan moderator terbaik yang dapat menghasilkan energi neutron di bawah 10 keV. Selain itu, bahan AlF_3 lebih efektif mereduksi neutron cepat. Bahan MgF_2 juga sering digunakan untuk memproduksi neutron dalam interval energi epitermal. MgF_2 lebih bagus karena memilikiampang lintang hamburan elastis yang baik untuk neutron cepat dan dua unsurnya

memiliki nomor massa yang kecil. Sehingga MgF_2 direkomendasikan sebagai bahan moderator karena hanya membutuhkan beberapa waktu saja untuk memoderasi neutron cepat^[8].

C. Desain dan Optimasi BSA

Dalam mendukung uji fasilitas BNCT untuk kanker yang berada di bawah permukaan kulit, nilai minimum neutron epitermal yang harus didapatkan adalah 10^9 n/cm²/s. Nilai neutron epitermal ini merupakan keluaran yang diharapkan dari BSA. Oleh sebab itu perlu didesain BSA yang dapat menghasilkan *output* sesuai dengan standar IAEA untuk BNCT pada Tabel 1 (lihat Gambar 2) agar setelah melewati beberapa jaringan tubuh yakni dari kulit, otot, lemak, dan lainnya, neutron yang diharapkan masuk ke jaringan tumor kanker adalah neutron termal^[9]. Dalam makalah ini mempunyai batasan masalah yakni hanya menguji coba (simulasi) pengoptimasian BSA (khususnya moderator) dengan menggunakan keluaran *neutron yield* dari NG milik PSTA-BATAN Yogyakarta untuk mendapatkan neutron epitermal pada keluaran BSA. Diameter keluaran BSA yang digunakan adalah 1 cm.



Gambar 2. (Color Online) Desain BSA untuk BNCT : (1) kolimator (udara), (2) Kolimator (Ni), (3) Moderator (MgF_2 dan AlF_3), (4) Reflektor(Pb), (5) Reflektor (Parafin), dan (6) Perisai Gamma (Bi)

Tabel 2. Variasi ketebalan moderator terhadap fluks epitermal dan neutron termal

No	Moderator (cm) + konfigurasi BSA	$\phi_{\text{epitermal}}$	$\frac{\phi_{\text{termal}}}{\phi_{\text{epitermal}}}$
1	MgF_2 (15)	$4,64 \times 10^8$	0,0023
2	MgF_2 (14) + AlF_3 (1)	$6,35 \times 10^7$	0,00045
3	MgF_2 (12) + AlF_3 (3)	$1,18 \times 10^8$	0,00018
4	MgF_2 (10) + AlF_3 (5)	$1,81 \times 10^8$	0,00020
5	MgF_2 (7,5) + AlF_3 (7,5)	$2,63 \times 10^8$	0,00017
6	MgF_2 (5) + AlF_3 (10)	$3,45 \times 10^8$	0,00018
7	MgF_2 (3) + AlF_3 (12)	$4,09 \times 10^8$	0,00024
8	MgF_2 (1) + AlF_3 (14)	$4,62 \times 10^8$	0,00051
9	AlF_3 (15)	$4,64 \times 10^8$	0,0026

Dalam pemilihan bahan kolimator dan reflektor BSA, kriteria yang direkomendasikan adalah harus memilikiampang lintang serapan yang kecil untuk neutron epitermal^[15]. Pada makalah ini salah satu bahan kolimator yang memenuhi kriteria tersebut adalah udara dan Ni sedangkan reflektornya dari unsur Pb (ketebalan 2 mm) dan Parafin^[10]. Bahan Pb dan Parafin digunakan untuk mencegah pengurangan neutron yang keluar dari moderator

selama proses moderasi berlangsung sehingga diharapkan jumlah neutron tetap stabil saat termoderasi sampai di ujung keluaran BSA. Untuk bahan perisai gamma yang digunakan adalah Bi karena memilikiampang lintang serapan yang kecil untuk neutron epitermal^[15]. Pengoptimasian BSA dilakukan dengan cara menetapkan ukuran kolimator, reflektor, dan perisai gamma terlebih dahulu. Kemudian bahan moderator (MgF_2 dan AlF_3) akan dioptimasi dengan mengatur ketebalannya. Ukuran ketebalan moderator yang divariasikan seperti yang terlihat pada Tabel 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Neutron Yield

Jumlah *neutron yield* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 adalah jumlah *neutron yield* dari NG milik PSTA-BATAN Yogyakarta dengan spesifikasi energi E tumbukan deutron sebesar 100-150 keV dan arus I dari 400-900 μA , yang diperoleh dari perhitungan menggunakan Persamaan 2.

Tabel 3. Produksi neutron/detik terhadap berkas arus I deutron dan energi E tumbukan deutron

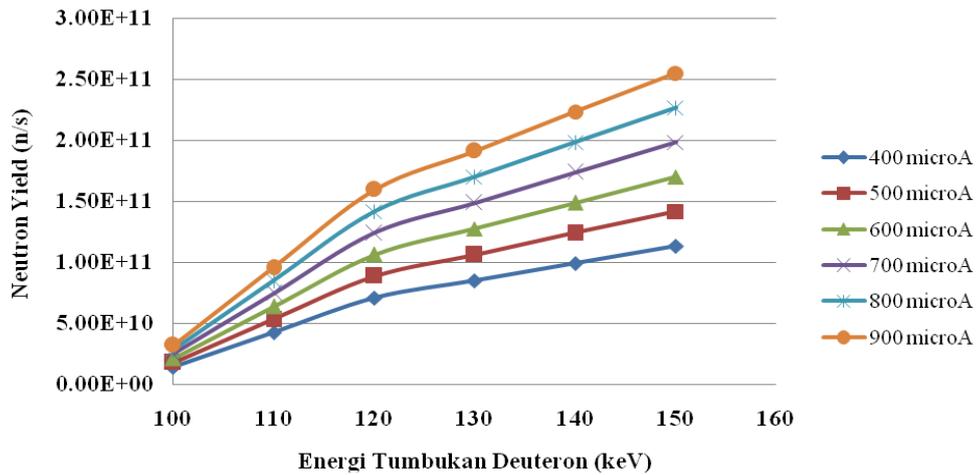
Energi Tumbukan Deutron (keV)	Neutron Yield (n/s)					
	400 μA	500 μA	600 μA	700 μA	800 μA	900 μA
100	$1,42 \times 10^{10}$	$1,77 \times 10^{10}$	$2,13 \times 10^{10}$	$2,48 \times 10^{10}$	$2,83 \times 10^{10}$	$3,19 \times 10^{10}$
110	$4,25 \times 10^{10}$	$5,31 \times 10^{10}$	$6,38 \times 10^{10}$	$7,44 \times 10^{10}$	$8,50 \times 10^{10}$	$9,56 \times 10^{10}$
120	$7,09 \times 10^{10}$	$8,86 \times 10^{10}$	$1,06 \times 10^{11}$	$1,24 \times 10^{11}$	$1,42 \times 10^{11}$	$1,59 \times 10^{11}$
130	$8,50 \times 10^{10}$	$1,06 \times 10^{11}$	$1,28 \times 10^{11}$	$1,49 \times 10^{11}$	$1,70 \times 10^{11}$	$1,91 \times 10^{11}$
140	$9,92 \times 10^{10}$	$1,24 \times 10^{11}$	$1,49 \times 10^{11}$	$1,74 \times 10^{11}$	$1,98 \times 10^{11}$	$2,23 \times 10^{11}$
150	$1,13 \times 10^{11}$	$1,42 \times 10^{11}$	$1,70 \times 10^{11}$	$1,98 \times 10^{11}$	$2,27 \times 10^{11}$	$2,55 \times 10^{11}$

Pada Tabel 3 terlihat semakin besar energi tumbukan deutron pada masing-masing interval arus I semakin besar pula *neutron yield* yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh perbedaanampang lintang σ disetiap rentang energi E tumbukan deutron. Untuk setiap rentang energi tumbukan deutron tersebut memilikiampang lintang σ seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai maksimum *neutron yield* yang dihasilkan terletak pada energi tumbukan deutron 150 keV dengan arus I sebesar 900 μA yaitu sebesar $2,55 \times 10^{11}$ n/s. Kurva kenaikan *neutron yield* dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 4. Tampang lintang σ (cm^2) terhadap energi tumbukan deutron (keV)

Energi Tumbukan Deutron (keV)	Tampang Lintang σ (cm^2)
100	$\pm 1,0 \times 10^{-26}$
110	$\pm 3,0 \times 10^{-26}$
120	$\pm 5,0 \times 10^{-26}$
130	$\pm 6,0 \times 10^{-26}$
140	$\pm 7,0 \times 10^{-26}$
150	$\pm 8,0 \times 10^{-26}$

Pada energi E tumbukan deutron 150 keV menunjukkanampang lintang σ yang relatif besar sehingga pada interval ini, *neutron yield* yang dihasilkan lebih besar dibandingkanampang lintang σ yang lainnya.



Gambar 3. (Color Online) Grafik Perbandingan neutron yield terhadap energi E tumbukan deuteron

Grafik pada Gambar 3 merupakan hasil perhitungan keluaran dari NG milik PSTA-BATAN Yogyakarta. Nilai neutron yield maksimum yang ditunjukkan adalah $2,55 \times 10^{11}$ n/s. Nilai neutron yield ini dipakai dalam mendesain BSA sebagai sumber neutron dengan energi E 2,45 MeV menggunakan perangkat lunak MCNPX.

b. Beam Shaping Assembly (BSA)

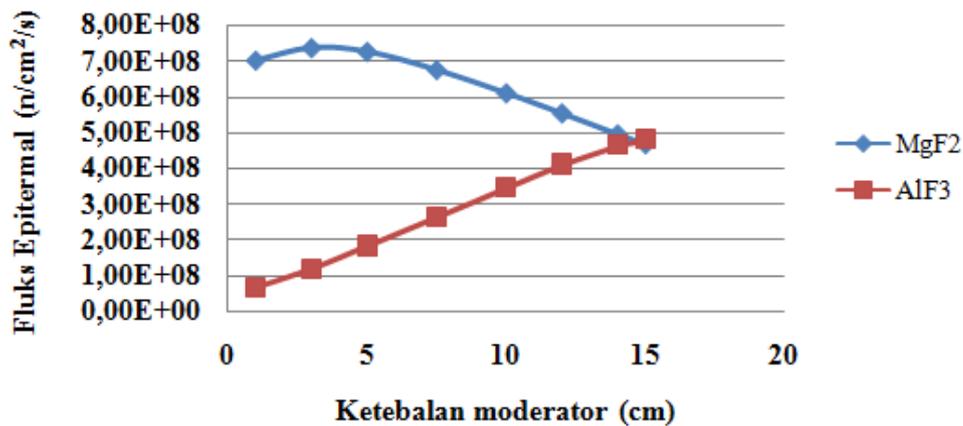
Dari beberapa variasi ketebalan moderator BSA yang sudah dioptimasi menggunakan perangkat lunak MCNPX (ditunjukkan oleh Tabel 2), semua masih belum memenuhi standar fluks epitermal yang direkomendasi oleh IAEA pada Tabel 1. Dari data Tabel 2 terlihat bahwa hasil keluaran BSA yang memiliki nilai fluks epitermal yang maksimal adalah sebesar $4,64 \times 10^8$ n/cm²/s untuk bahan MgF₂ dan AlF₃ dengan masing-masing ketebalan moderator adalah 15 cm. Moderator ini meskipun masih belum memenuhi fluks epitermal sesuai standar IAEA, ada beberapa parameter lain yang sudah memenuhi kriteria seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan rekomendasi IAEA dengan hasil optimasi

Notasi (satuan)	Rekomendasi IAEA	Hasil Optimasi BSA	
		MgF ₂ (15 cm)	AlF ₃ (15 cm)
$\phi_{\text{epitermal}} \text{ (n/cm}^2\text{/s)}$	$> 10^9$	$4,64 \times 10^8$	$4,64 \times 10^8$
$\dot{D}_f / \phi_{\text{epitermal}} \text{ (Gy.cm}^2\text{)}$	$< 2 \times 10^{-13}$	$1,32 \times 10^{-10}$	$1,60 \times 10^{-10}$
$\dot{D}_\gamma / \phi_{\text{epitermal}} \text{ (Gy.cm}^2\text{)}$	$< 2 \times 10^{-13}$	$1,88 \times 10^{-13}$	$1,86 \times 10^{-13}$
$\phi_{\text{termal}} / \phi_{\text{epitermal}}$	$< 0,05$	0,0023	0,0026
$J / \phi_{\text{epitermal}}$	$> 0,7$	3,10	3,76

Tabel 5 menunjukkan besar fluks epitermal hasil optimasi BSA dengan menggunakan bahan moderator MgF₂ dan AlF₃ yang masih belum memenuhi standar IAEA. Hal ini disebabkan suplai neutron yield dari sumber NG masih relatif kecil sehingga keluaran dari BSA belum bisa mencukupi fluks epitermal sesuai standar IAEA. Akan tetapi ada beberapa parameter yang sudah memenuhi kriteria yang direkomendasikan oleh IAEA antara lain perbandingan laju dosis gamma (Gy.cm²) dengan fluks neutron epitermal (n/cm²/s) yakni sebesar $1,86 \times 10^{-13}$ (Gy.cm²). Nilai ini memenuhi kriteria karena masih lebih kecil dari 2×10^{-13} (Gy.cm²). Selanjutnya, nilai yang memenuhi standar IAEA adalah perbandingan fluks termal dan epitermal lebih kecil dari 0,05 yakni untuk MgF₂ sebesar

0,0023 dan AlF_3 0,0026 serta nilai perbandingan berkas arus J dengan fluks epitermal diatas 0,7 yakni 3,10 untuk MgF_2 dan 3,76 untuk AlF_3 .



Gambar 4. (Color Online) Pengaruh ketebalan moderator terhadap fluks epitermal

Perubahan fluks neutron terhadap ketebalan moderator ditunjukkan oleh Gambar 4. Moderator MgF_2 pada ketebalan 3 cm memberikan nilai fluks yang maksimal yakni sebesar $7,36 \times 10^8$ n/cm²/s. Kemudian semakin bertambah ketebalan moderator fluksnya semakin kecil. Artinya, besarampang lintang hamburan elastis dengan menggunakan bahan MgF_2 maksimum pada ketebalan 3 cm. Sedangkan moderator berbahan AlF_3 cenderung fluks epitermalnya naik dari ketebalan terkecil 1 cm sampai 15 cm. Hal ini disebabkanampang lintang hamburan elastisnya maksimum pada ketebalan 15 cm yakni dengan fluks epitermal sebesar $4,78 \times 10^8$ n/cm²/s. Jika diteruskan pada ketebalan berikutnya, bahan AlF_3 fluks epitermalnya akan cenderung menurun.

KESIMPULAN

Perhitungan *neutron yield* NG milik PSTA-BATAN Yogyakarta memberikan hasil yang maksimum yakni sebesar $2,55 \times 10^{11}$ n/s pada energi E tumbukan deutron 150 keV dengan arus I 900 μA . Hasil optimasi BSA menunjukkan bahwa nilai fluks epitermal yang dihasilkan sebesar $4,64 \times 10^8$ n/cm²/s masih belum memenuhi standar yang direkomendasikan oleh IAEA sehingga NG milik PSTA-BATAN Yogyakarta masih belum bisa digunakan untuk uji fasilitas BNCT untuk posisi tumor kanker di bawah permukaan kulit.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada PSTA-BATAN Yogyakarta yang sudah memberikan ijin untuk melakukan observasi di ruang neutron generator sehingga penulis mendapatkan beberapa informasi terkait spesifikasi NG milik PSTA-BATAN Yogyakarta.

DAFTAR PUSTAKA

1. Masayori, I., Kenichi, T., Satrou, E., dan Masaharu, H. 2015. Application of an Ultraminiature Thermal Neutron Monitor for Irradiation Field Study of Accelerator-Based Neutron Capture Therapy. *Journal of Radiation Research*, Hal. 1-6.
2. Bergaoui, K., Reguigui, N., Gary, C.K., Brown, C., Cremer, J.T., dan Vainionpa, J.H. 2014. Development of New Deuterium-Deuterium (D-D) Neutron Generator for Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 94, Hal. 319-327.

3. Morcos, H.N., dan Naguib, K. 2014. Production of Optimal Epithermal Neutron Beams for BNCT. *Sop Transactions On Applied Physics*, Vol. 1, No. 2.
4. Zafer, A. 2015. Boron Neutron Capture Therapy for Breast Cancer. *International Journal of Women's Health and Reproduction Sciences*, Vol. 3, No. 2. Hal. 77.
5. Fantidis, J.G., Saitioti, E., Bandekas, D.V., dan Vordos, N. 2013. Optimised BNCT Facility Based on a Compact D-D Neutron Generator. *International Journal of Radiation Research*, Vol. 11, No. 4, Hal. 207-214
6. Tetsuya, M., Tetsuo, M., dan Koji, N. 2011. Study on Microdosimetry for Boron Neutron Capture Therapy. *Progress in Nuclear Science and Technology*, Vol. 2, Hal. 242-246.
7. Farshad, F. 2012. Monte-Carlo Simulation for Beam Shaping Assembly of Boron Neutron Capture Therapy. *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul*. Turkey.
8. Danial, S., Dariush, S., dan Milad, S. 2012. Evaluation of Design Neutron Filters in BNCT. *Open Acces Scientific Reports*, Vol.1, Issue 11.
9. Fatemeh, S. R., dan Seyed, F. M. 2012. Simulation of the BNCT of Brain Tumors Using MCNP Code: Beam Design and Dose Evaluation. *Iranian Journal of Medical Physics*, Vol. 9, No. 3, Hal. 183-192.
10. Fatemeh, T. S., Farhad, M., Faezeh, R., dan Fatemeh, S. R. 2014. BSA Optimization and Dosimetric Assessment for an Electron Linac based BNCT of Deep-Seated Brain Tumors. *Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 300, Hal. 1167-1174.
11. Sam, S., dan Nargolwalla. 1973. *Activation Analysis with Neutron Generator*. Wiley, The University of Machigan, Hal. 15-23.
12. Djoko, S.P., Prajotno, Slamet, S., Lely, S., Suharni, Taufik, dan Sardjono, Y. 2014. *Generator Neutron Kompak Sebagai Sumber Neutron untuk BNCT*. Status Boron Neutron Capture Cancer Therapy di Indonesia, Hal. 479-489.
13. Alejandro, A. B., Santiago, G., Alejandro, A., Valda, Daniel, M. M., dan Andres, J. K. 2010. Experimental and Simulated Characterization of a Beam Shaping Assembly for Accelerator-Based Neutron Capture Therapy (AB-BNCT). *VIII Latin American Symposium on Nuclear Physics and Application*. American Institute of Physics.
14. Vainionpaa, J.H., Gary, C.K., Harris, J.L., Piestrup, M.A., Pantell, R.H., dan Jones, G. 2014. Technology and Applications of Neutron Generators Developed by Adelphi Technology, Inc. *Physics Procedia*, Vol. 60, Hal. 203-211.
15. Kasesaz, Y., Khalafi, H., dan Rahmani, F. 2013. Optimization of the Beam Shaping Assembly in the D-D Neutron Generators-Based BNCT Using the Response Matrix Method. *Applied Radiation and Isotope*, Vol. 82, Hal. 55-59.
16. IAEA. 2001. *Current Status of Neutron Capture Therapy*. Viena: IAEA, ISSN 1011-4298
17. Tak, P., dan Lou. 2003. Compact D-D/D-T Neutron Generators and Their Applications. *Disertasi*. Nuclear Engineering, University of California, Berkeley, Hal. 5-6.