

PREDIKSI SECARA TEORI AKTIVITAS ^{18}F DARI HASIL REAKSI $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ PADA BEBERAPA SIKLOTRON MEDIK

Hari Suryanto¹, Silakhuddin²

1) Pusat Radiosotop dan Radiofarmaka – BATAN

2) Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan - BATAN

ABSTRAK

PREDIKSI SECARA TEORI AKTIVITAS ^{18}F DARI HASIL REAKSI $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ PADA BEBERAPA SIKLOTRON MEDIK. Telah dilakukan perhitungan secara teori untuk menentukan kapasitas produksi ^{18}F dari hasil reaksi $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ dari beberapa siklotron medik. Siklotron medik (*baby cyclotron*) yang dimaksud disini adalah siklotron yang mempunyai jangkauan energi antara 7,5 MeV sampai dengan 18 MeV. Hasil yang diperoleh dari perhitungan tersebut diharapkan dapat digunakan untuk memprediksi aktivitas ^{18}F FDG(2- ^{18}F fluoro-2-deoxy-d-glucose) yang akan dihasilkan. Disamping itu juga diharapkan dapat digunakan sebagai gambaran awal bagi calon pengguna siklotron dalam memilih siklotron sesuai dengan kapasitas produksi yang diperlukan. Dari perhitungan yang diperoleh, kapasitas produksi ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ yang terbesar adalah yang dihasilkan dari siklotron yang mempunyai energi berkas proton sebesar 18 MeV. Besarnya aktivitas ^{18}F yang diperoleh sekitar 2.900 mCi untuk arus berkas 40 μA dan lama iradiasi 1 jam. Sedangkan untuk siklotron yang mempunyai energi berkas berturut-turut 13 MeV, 11 MeV, 10 MeV, 9 MeV dan 7,5 MeV untuk kondisi operasi siklotron yang sama, mempunyai kapasitas produksi sebesar berturut-turut sekitar 2.300 mCi, 2.000 mCi, 1.800 mCi, 1.600 mCi dan 1.200 mCi atau berturut-turut sekitar 80%, 70%, 61%, 55% dan 41% bila dibandingkan dengan kapasitas produksi dari siklotron yang mempunyai energi berkas proton 18 MeV.

Kata kunci: Siklotron, Kapasitas produksi ^{18}F

ABSTRACT

THE THEORETICAL PREDICTION OF ^{18}F ACTIVITY FROM THE REACTION OF $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ FOR SOME MEDICAL CYCLOTRONS. The theoretical calculations to determine the production capacity of ^{18}F from the reaction of $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ for some medical cyclotrons have been carried out. The medical cyclotron (*baby cyclotrons*) were meant here is the cyclotron which has the energy range between 7.5 MeV to 18 MeV. The results of these calculations are expected to be used for predict the resulted activity of ^{18}F FDG(2- ^{18}F fluoro-2-deoxy-d-glucose). In addition, the results of these calculations is also expected to be used as an initial overview for prospective users to choose the cyclotron in accordance with the required production capacity. From the calculation obtained that the biggest production capacity of ^{18}F from the reaction of $^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$ is generated by the cyclotron which has proton beam energy of 18 MeV. The amount of ^{18}F activity which obtained is about 2,900 mCi for the proton beam current of 40 μA and the irradiation time of 1 hour. While for the cyclotron which has the proton beam energy of 13 MeV, 11 MeV, 10 MeV, 9 MeV and 7.5 MeV respectively, for the same operating conditions, has a ^{18}F production capacity of about 2,300 mCi, 2000 mCi, 1,800 mCi, 1,600 mCi and 1,200 mCi respectively, or about 80%, 70%, 61%, 55% and 41% respectively, compared with the production capacity of the cyclotron which has proton beam energy of 18 MeV.

Keywords: Cyclotron, ^{18}F production capacity

PENDAHULUAN

Sebuah era baru diagnosis kedokteran nuklir di Indonesia telah dimulai dengan teknologi *Positron Emission Tomography* (PET). Teknologi PET ini tidak dapat dipisahkan dengan teknologi siklotron, karena radionuklida pemancar positron yang digunakan dalam pencitraan PET dihasilkan dari suatu reaksi nuklir dari penembakan partikel bermuatan yang dipercepat dengan menggunakan siklotron. Siklotron itu sendiri dalam aplikasi medis, menurut Wolf dan Jones 1983, dapat diklasifikasikan menjadi tiga tingkatan (*level*) yaitu tingkat pertama adalah siklotron yang mempunyai energi di bawah 10 MeV yang dapat mempercepat proton dan deuteron, tingkat kedua adalah siklotron yang mempunyai energi di bawah 20 MeV dan dapat mempercepat proton atau partikel lain dan tingkat ketiga adalah siklotron yang mempunyai energi diatas 20 MeV dan dapat mempercepat proton atau partikel lain. Siklotron tingkat pertama dan tingkat kedua adalah sangat sesuai untuk keperluan produksi radionuklida untuk keperluan pencitraan PET dan siklotron jenis ini sering disebut sebagai "*Baby Cyclotron*" atau siklotron medik ("*Medical Cyclotron*"). Untuk produksi radionuklida dengan siklotron medik ini, partikel seperti proton, ataupun deuteron yang telah dipercepat kemudian ditembakkan pada bahan target yang cocok untuk menghasilkan radionuklida pemancar positron. Radionuklida pemancar positron tersebut dapat dihasilkan dari reaksi-reaksi (p,), (p, n), (p,2n), (p,4n) atau (d, n).

Radionuklida yang cocok untuk digunakan dalam keperluan medik ini adalah radionuklida

berumur paro pendek. Dalam cara produksinya, radionuklida yang dihasilkan dari siklotron ini dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok yaitu kelompok pertama adalah radionuklida yang berasal dari turunan (peluruhan) radionuklida lain dan kelompok kedua adalah radionuklida berasal dari reaksi langsung. Yang termasuk kelompok pertama seperti misalnya ^{201}Tl ($T_{1/2}=73,06$ jam) berasal dari peluruhan ^{201}Pb dari reaksi nuklir $^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ dan ^{123}I ($T_{1/2}=1,2$ jam) berasal dari peluruhan ^{123}Xe dari reaksi nuklir $^{124}\text{Xe}(p,pn)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$. Kedua radionuklida tersebut merupakan radionuklida pemancar gamma (*gamma emitters*). Demikian juga radionuklida ^{68}Ge ($T_{1/2}=270,8$ hari) berasal dari peluruhan ^{68}Ga dari reaksi nuklir $^{69}\text{Ga}(p,2n)^{68}\text{Ga} \rightarrow ^{68}\text{Ge}$ dan radionuklida ^{82}Sr ($T_{1/2}=25,55$ hari) berasal dari reaksi nuklir $^{85}\text{Rb}(p,4n)^{82}\text{Rb} \rightarrow ^{82}\text{Sr}$. Kedua radionuklida tersebut merupakan radionuklida pemancar positron (*positron emitters*). Untuk keperluan produksi radionuklida kelompok pertama ini memerlukan energi proton antara 20 hingga 70 MeV atau menggunakan siklotron tingkat ketiga. Sedang radionuklida kelompok kedua adalah juga merupakan radionuklida pemancar positron, seperti ^{11}C ($T_{1/2}=20,39$ menit) dapat berasal dari reaksi nuklir $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$, ^{13}N ($T_{1/2}=9,96$ menit) dapat berasal dari reaksi nuklir $^{16}\text{C}(p,\alpha)^{13}\text{N}$, ^{15}O ($T_{1/2}=2,04$ menit) dapat berasal dari reaksi nuklir $^{15}\text{N}(p,n)^{15}\text{O}$, atau $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ dan ^{18}F ($T_{1/2}=109,8$ menit) dapat berasal dari reaksi nuklir $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$. Kelompok kedua ini dapat diproduksi dengan menggunakan "*Baby Cyclotron*" karena hanya memerlukan energi proton dalam kisaran antara 7 sampai dengan 19 MeV.

Spesifikasi berkas proton suatu siklotron ditandai dengan 2 parameter utama operasi yaitu besarnya arus dan energi berkas proton. Arus berkas proton pada umumnya dapat mencapai lebih dari 50 μA . Fasilitas siklotron untuk PET biasanya menggunakan siklotron tingkat pertama atau tingkat kedua (*Baby Cyclotron*) yang mempunyai spesifikasi energi berkas proton yang berbeda-beda yaitu diantaranya adalah 7,5 MeV, 9, MeV, 10 MeV, 11 MeV, 13 MeV dan 18 MeV.

Pada makalah ini disajikan hasil perhitungan *yield* radionuklida yang diperoleh dari siklotron jenis “Baby” yang didedikasikan untuk produksi FDG. Hasil yang diperoleh dari perhitungan tersebut diharapkan dapat dipakai untuk memprediksi aktivitas FDG yang akan dihasilkan dan sekaligus sebagai gambaran awal bagi calon pengguna siklotron dalam menentukan pilihan siklotron berdasarkan tingkat energi dan arus berkas proton yang dihasilkan untuk menentukan kapasitas produksinya

TATA KERJA

Dalam makalah ini dilakukan perhitungan aktivitas ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ dengan energi proton bervariasi antara 7,5 MeV sampai dengan 18 MeV. Siklotron diasumsikan beroperasi dengan arus berkas proton yang sebesar berturut-turut 1 μA , 10 μA , 20 μA , 30 μA dan 40 μA , kemudian diiradiasikan pada target air diperkaya ^{18}O dengan pengkayaan 97%. Lama iradiasi dari 10 menit sampai dengan 120 menit (2jam). Perhitungan aktivitas ^{18}F ini dilakukan tepat setelah berakhirnya iradiasi (*activity at end of irradiation* = A_{EOI}). Perhitungan aktivitas FDG pada akhir sintesa

(*activity at end of synthesis* = A_{EOS}) juga disajikan dengan mengambil ratio $A_{\text{EOS}}/A_{\text{EOI}} = 0,5$.

Perhitungan Aktivitas ^{18}F dari Reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$

Aktivitas radionuklida ^{18}F yang dihasilkan dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ secara teoritis dapat ditentukan dengan formulasi :

$$Y = \phi \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \cdot \frac{N_A}{M} \cdot \int_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx})} dE \quad (1)$$

di mana:

- Y adalah aktivitas ^{18}F yang dihasilkan,
- \dots adalah banyaknya partikel bermuatan
- ϕ adalah tetapan peluruhan radioaktif radionuklida yang dihasilkan,
- t adalah lama waktu penembakkan,
- N_A adalah bilangan Avogadro,
- M adalah nomor massa atom target,
- E_{th} adalah energi ambang reaksi nuklir,
- E_i adalah energi datang dari partikel penembak,
- $\sigma(E)$ adalahampang lintang reaksi nuklir pada energi E dan,
- $(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx})$ adalah *stopping power* partikel penembak dalam material target.

Suku $(1 - e^{-\lambda \cdot t})$ dari persamaan (1) dinamakan faktor waktu pertumbuhan sedangkan suku $\frac{N_A}{M} \cdot \int_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx})} dE$ adalah faktor aktivitas jenuh. Secara praktis, beberapa konversi dari suku-suku dalam persamaan (1) dapat dimodifikasi sebagai berikut:

1. Nilai ϕ dapat dikonversi kedalam besaran arus partikel bermuatan yaitu menjadi:

$$\phi = \frac{6,25 \cdot 10^{18} \cdot I}{Z} \quad (2)$$

di mana I adalah arus partikel bermuatan penembak dan Z adalah nomor muatan partikel bermuatan tersebut.

2. Suku $\int_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)} dE$ dapat dirubah dalam bentuk penjumlahan secara diskrit menjadi:

$$\sum_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)} \cdot \Delta E \quad (3)$$

di mana ΔE adalah *step* energi dari data tampang lintang reaksi nuklir dan *stopping power* yang diambil, dan besarnya ΔE ini tergantung dari data yang tersedia. Dengan demikian maka persamaan (1) dapat dituliskan kembali menjadi :

$$Y = \frac{6,25 \cdot 10^{18} \cdot I}{Z} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \cdot \frac{N_A}{M} \cdot \sum_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)} \cdot \Delta E \quad (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivitas radionuklida ^{18}F dari reaksi nuklir $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$, dihitung dengan menggunakan persamaan (4) dengan menggunakan parameter-parameter sebagai berikut:

1. I adalah arus proton, yang dalam perhitungan ini diambil antara $1 \mu\text{A}$ sampai dengan $40 \mu\text{A}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ A}$ sampai dengan $4 \times 10^{-5} \text{ A}$),
2. adalah tetapan peluruhan dari ^{18}F yang besarnya $0,0063$ per menit = $0,378$ per jam,
3. t adalah lama iradiasi, ditetapkan mulai dari 10 menit sampai dengan 120 menit ($\frac{1}{6}$ jam sampai dengan 2 jam),
4. N_A adalah bilangan Avogadro, yang nilainya sama dengan $6,022 \times 10^{23}$ per mol,

5. adalah kerapatan massa atom ^{18}O dalam air. Jika digunakan air diperkaya produk ISOFLEX [3], dengan pengkayaan 97% maka nilai adalah $0,97 \text{ gr/cm}^3$,
6. M nomor massa ^{18}O yaitu 18,
7. E_{th} energi proton ambang reaksi nuklir terkait sebesar $2,5 \text{ MeV}$,
8. E_i energi datang dari proton yang akan diambil sebesar $7,5; 9; 10; 11; 13$ dan 18 MeV ,
9. $\sigma(E)$ adalah tampang lintang reaksi, diambil dari database IAEA, seperti pada Lampiran 2,
10. $\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)$ *stopping power* proton pada material air, datanya diambil dari perhitungan program PSTAR seperti tercantum dalam Lampiran 3,
11. ΔE , diambil $0,5 \text{ MeV}$.

Dengan menggunakan parameter di atas, diperoleh hasil perhitungan aktivitas ^{18}F pada akhir iradiasi (Y_{EOI}) dan aktivitas FDG pada akhir sintesa (EOS) untuk beberapa energi proton dan beberapa variasi lama iradiasi dengan arus berkas proton sebesar $1 \mu\text{A}$, dimana hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel-1.

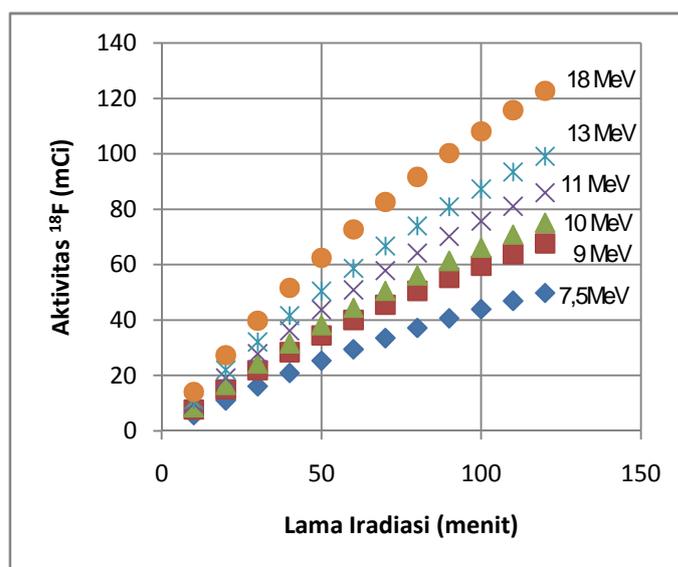
Dari Tabel-1 tersebut, dapat dilihat bahwa untuk operasi siklotron selama 1 jam (60 menit) dengan arus berkas $1 \mu\text{A}$, *yield* radionuklida ^{18}F yang diperoleh untuk energi berkas proton berturut-turut $7,5 \text{ MeV}; 9 \text{ MeV}; 10 \text{ MeV}; 11 \text{ MeV}; 13 \text{ MeV}$ dan 18 MeV adalah berturut-turut $29,476 \text{ mCi}; 40,057 \text{ mCi}; 44,491 \text{ mCi}; 50,885 \text{ mCi}; 58,691 \text{ mCi}; 72,679 \text{ mCi}$. Atau secara grafis *yield* radionuklida ^{18}F untuk energi $7,5 \text{ MeV}; 9 \text{ MeV}; 10 \text{ MeV}; 11 \text{ MeV}; 13 \text{ MeV};$ dan 18 MeV dengan arus berkas proton sebesar $1 \mu\text{A}$ dapat dilihat pada Gambar-1.

Tabel 1. Aktivitas radionuklida ^{18}F pada akhir iradiasi (Y_{EOI}) dan aktivitas FDG pada akhir sintesa (EOS) untuk beberapa energi berkas proton dan beberapa variasi lama iradiasi dengan arus berkas proton sebesar $1\ \mu\text{A}$.

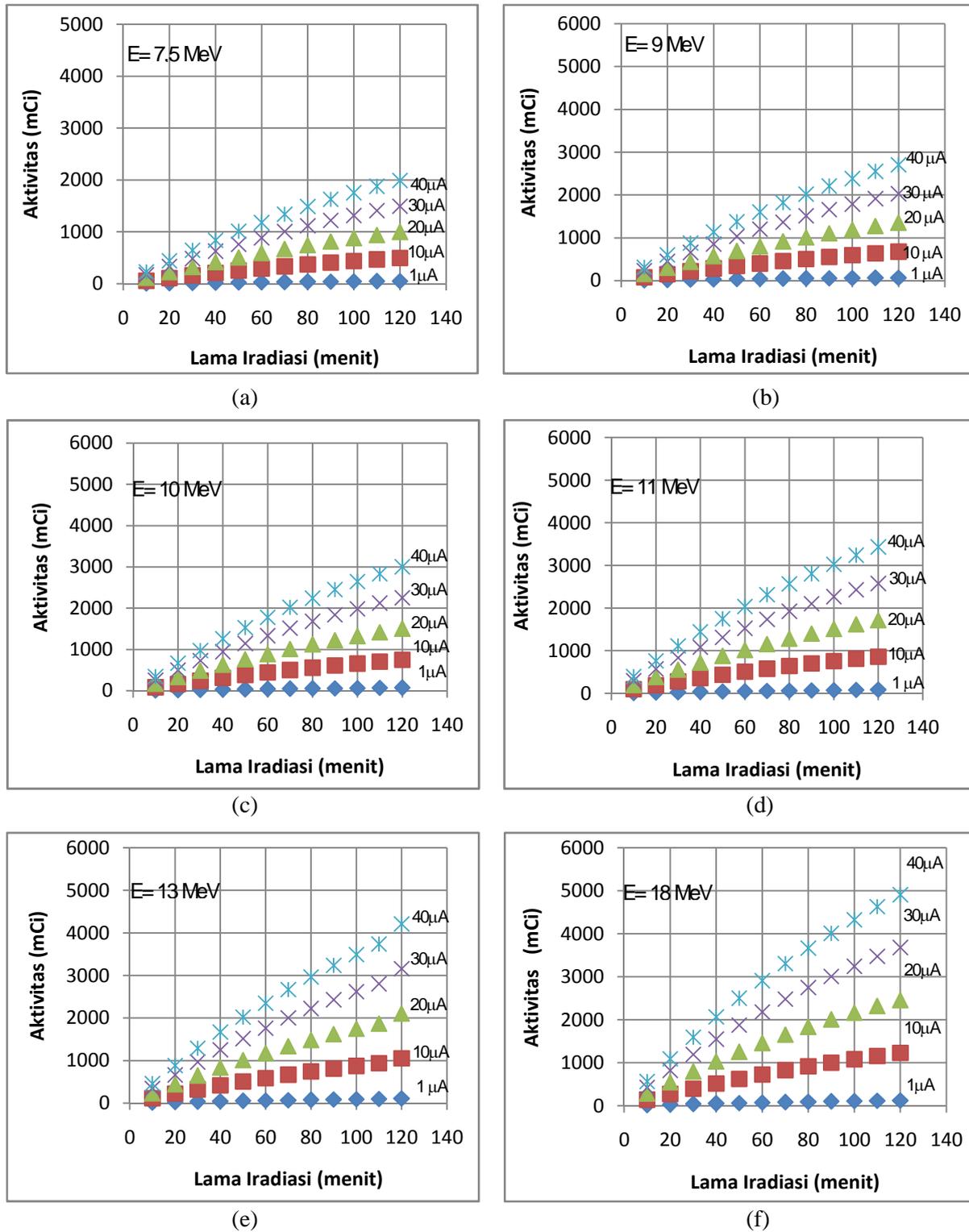
t (menit)	7,5 MeV		9 MeV		10 MeV		11 MeV		13 MeV		18 MeV	
	$Y_{\text{EOI}}^{18}\text{F}$ (mCi)	FDG_{EOS} (mCi)										
10	5,726	2,863	7,782	3,891	8,643	4,322	9,885	4,943	11,402	5,701	14,119	7,060
20	11,077	5,5385	15,053	7,5265	16,720	8,360	19,122	9,561	22,056	11,028	27,313	13,657
30	16,146	8,073	21,942	10,971	24,371	12,186	27,873	13,937	32,149	16,075	39,812	19,906
40	20,934	10,467	28,448	14,224	31,597	15,799	36,138	18,069	41,682	20,841	51,616	25,808
50	25,345	12,6725	34,443	17,222	38,257	19,129	43,755	21,878	50,467	25,234	62,495	31,248
60	29,476	14,738	40,057	20,029	44,491	22,246	50,885	25,443	58,691	29,346	72,679	36,340
70	33,512	16,756	45,542	22,771	50,584	25,292	57,854	28,927	66,728	33,364	82,632	41,316
80	37,173	18,5865	50,517	25,259	56,110	28,055	64,174	32,087	74,018	37,009	91,659	45,830
90	40,647	20,3235	55,237	27,619	61,352	30,676	70,170	35,085	80,934	40,467	100,223	50,112
100	43,936	21,968	59,574	29,787	66,170	33,085	75,680	37,840	87,289	43,645	108,093	54,047
110	46,936	23,468	63,785	31,893	70,846	35,423	81,028	40,514	93,457	46,729	115,732	57,866
120	49,752	24,876	67,612	33,806	75,096	37,548	85,889	42,945	99,064	49,532	122,675	61,338

Dari Tabel-1 maupun dari Gambar-1, dapat diketahui bahwa *yield* radionuklida ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ pada penggunaan energi berkas proton berturut-turut 7,5 MeV; 9 MeV; 10 MeV; 11 MeV dan 13 MeV bila dibandingkan terhadap penggunaan energi berkas proton sebesar 18 MeV hasilnya

adalah berturut-turut sekitar 41%, 55%, 61%, 70% dan 80%. Pada Gambar-2 ditunjukkan *yield* radionuklida ^{18}F untuk arus berkas proton berturut-turut $1\ \mu\text{A}$; $10\ \mu\text{A}$; $20\ \mu\text{A}$; $30\ \mu\text{A}$ dan $40\ \mu\text{A}$ untuk beberapa variasi energi dan lama iradiasi.



Gambar-1 : *Yield* radionuklida ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ untuk beberapa variasi energi berkas proton dan beberapa variasi lama waktu iradiasi dengan arus berkas proton sebesar $1\ \mu\text{A}$



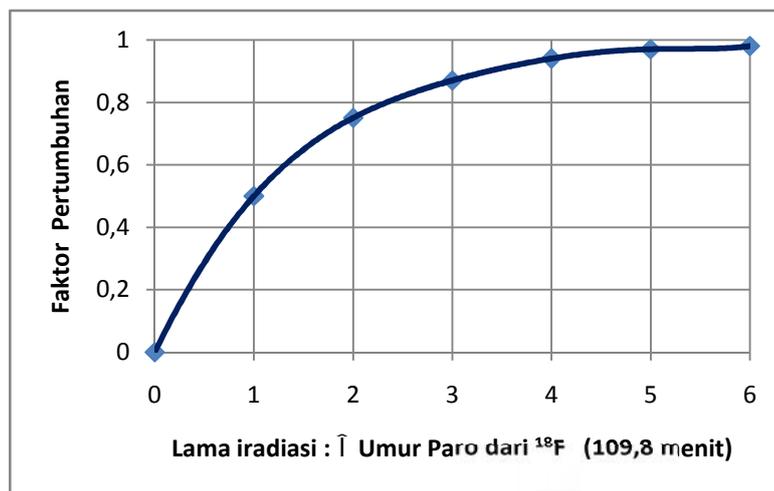
Gambar-2 : Yield radionuklida ^{18}F untuk arus berkas proton berturut-turut 1 μA ; 10 μA ; 20 μA ; 30 μA dan 40 μA pada beberapa variasi energi dan lama iradiasi. (a) untuk $E=7,5$ MeV, (b) untuk $E=9$ MeV, (c) untuk $E=10$ MeV, (d) untuk $E=11$ MeV, (e) untuk $E=13$ MeV, (f) untuk $E=18$ MeV.

Dari Gambar-2 di atas dapat dilihat bahwa semakin besar penggunaan energi berkas proton yaitu dari 7,5 MeV hingga 18 MeV, *yield* radionuklida ^{18}F yang dihasilkan semakin tinggi pula. Namun demikian untuk penggunaan energi yang lebih tinggi lagi *yield* radionuklida ini akan menurun berkenaan denganampang lintang reaksi nuklir dari pembentukan ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ yang optimal adalah pada energi 18 MeV. Lama iradiasi yang dilakukan dalam produksi radionuklida ini juga mempengaruhi *yield* radionuklida yang diperoleh. Bila dilihat dari formulasi persamaan (1) di atas, yaitu :

$$Y = \phi \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \cdot \frac{N_A}{M} \cdot \int_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx})} dE$$

dimana suku $(1 - e^{-\lambda t})$ merupakan faktor waktu pertumbuhan yang berbentuk eksponensial, maka semakin lama waktu iradiasi yang digunakan akan semakin besar *yield* radionuklida yang diperoleh.

Namun demikian nilai *yield* radionuklida tersebut akan mendekati nilai jenuhnya (mendekati faktor 1) mana kala suku $e^{-\lambda t}$ semakin kecil, atau lama waktu iradiasi semakin panjang. Sehingga ada nilai batas waktu (lama iradiasi) tertentu hingga menjadikan produksi radionuklida ini sudah tidak efektif lagi. Kenaikan *yield* terhadap waktu yang paling efektif adalah untuk waktu iradiasi sampai dengan satu umur paro dari radionuklida yang bersangkutan (Gambar-3). Sedang dari nilai ϕ yang merupakan jumlah atau banyaknya partikel bermuatan penembak per satuan waktu yang dalam hal ini dapat dikonversi kedalam besarnya arus berkas partikel bermuatan dalam bentuk : $\phi = \frac{6,25 \cdot 10^{18} \cdot I}{Z}$. Untuk partikel penembak proton, maka nilai $Z = 1$. Dari persamaa persamaan tersebut tampak bahwa *yield* radionuklida yang dihasilkan adalah linier terhadap penggunaan arus berkas I .

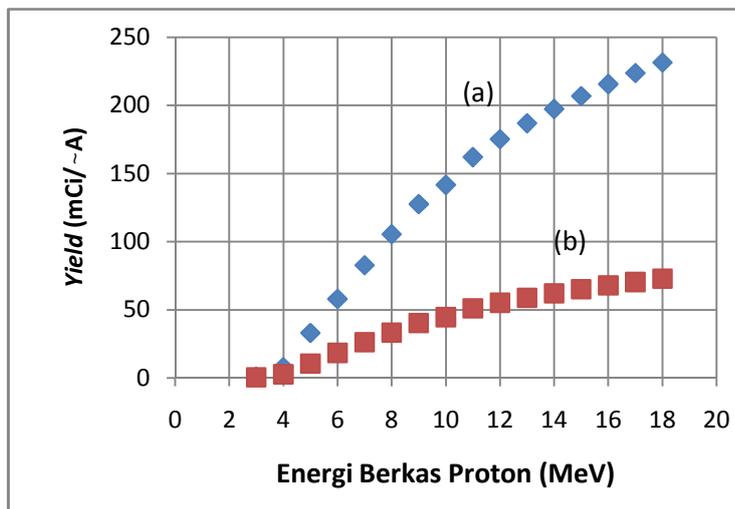


Gambar-3 : Faktor waktu pertumbuhan $(1 - e^{-\lambda t})$ dari radionuklida ^{18}F dari reaksi nuklir $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ sebagai fungsi lama iradiasi.

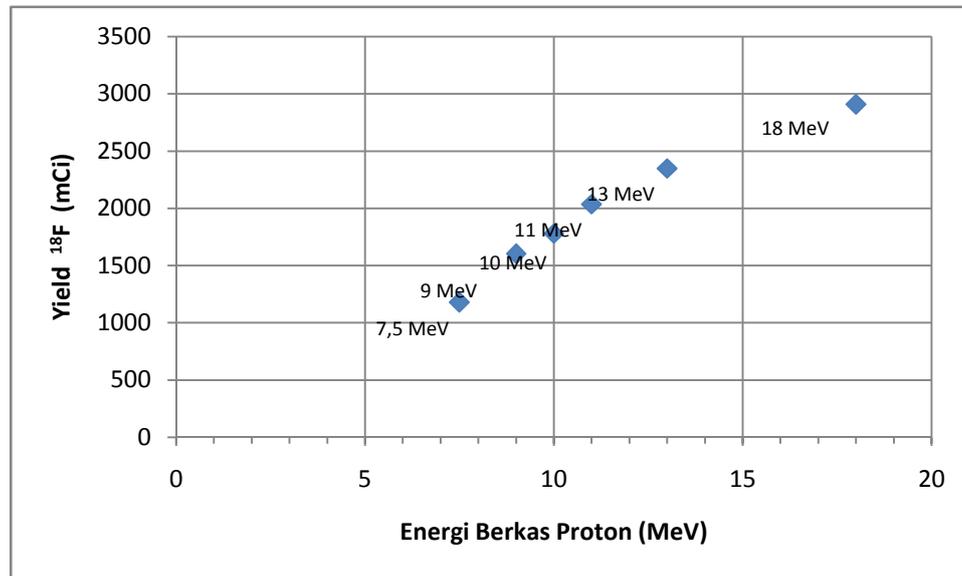
Suku $\frac{N_A}{M} \cdot \int_{E_i}^{E_{th}} \frac{\sigma(E)}{\left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}\right)} dE$ dari persamaan (1) adalah merupakan faktor aktivitas jenuh, dimana untuk reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$, aktivitas jenuh pembentukan ^{18}F untuk setiap μA arus berkas proton pada energi berkas proton dari 3 MeV hingga 18 MeV ditunjukkan pada Gambar-4 kurva(a). Sedang Gambar-4 kurva (b) menunjukkan *Yield* yang diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan formulasi dari persamaan (1) yang melibatkan faktor pertumbuhan.

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan formulasi persamaan (1) terlihat bahwa *yield* radionuklida ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ mulai dari energi berkas proton 3 MeV sampai dengan 18 MeV cenderung meningkat, dimana peningkatan tersebut dapat didekati dengan tiga interval peningkatan, yang pertama adalah interval energi dari 3 sampai

dengan 4 MeV mempunyai *gradient* (atau $\frac{dy}{dx}$) sebesar 2,5 mCi/MeV, yang kedua adalah interval energi dari 4 sampai dengan 11 MeV mempunyai *gradient* sebesar 6 mCi/MeV dan yang ketiga adalah interval energi dari 12 hingga 18 MeV yang mempunyai *gradient* sebesar 3,6 mCi/MeV. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada interval energi dari 4 sampai 11 MeV akan menghasilkan penambahan *yield* radionuklida yang terbesar pada setiap penambahan energi berkas proton dibandingkan dengan dua interval energi lainnya. Pada Gambar-5 ditunjukkan kapasitas produksi ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ pada siklotron yang mempunyai energi berturut-turut 7,5 MeV, 9 MeV, 10 MeV, 11 MeV, 13 MeV dan 18 MeV bila siklotron dioperasikan pada arus berkas proton sebesar 40 μA dan lama waktu iradiasi 1 jam.



Gambar-4 : *Yield* dari radionuklida ^{18}F yang diperoleh untuk setiap μA arus berkas proton dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ untuk energi berkas proton dari 3 sampai dengan 18 MeV.
(a) *yield* radionuklida ^{18}F dari faktor aktivitas jenuh dan
(b) *yield* radionuklida ^{18}F dari formulasi persamaan (1).



Gambar-5 : Kapasitas produksi ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ pada beberapa siklotron untuk arus berkas proton 40 μA dan lama iradiasi 1 jam.

Dari Gambar-5 tersebut dapat dilihat bahwa kapasitas produksi ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ yang terbesar adalah yang dihasilkan oleh siklotron yang mempunyai energi berkas proton sebesar 18 MeV yang besarnya sekitar 2.900 mCi untuk arus berkas 40 μA dan lama iradiasi 1 jam. Sedang untuk siklotron yang mempunyai energi berkas berturut-turut 13 MeV, 11 MeV, 10 MeV, 9 MeV dan 7,5 MeV untuk kondisi operasi siklotron yang sama, yaitu untuk arus berkas 40 μA dan lama iradiasi 1 jam, mempunyai kapasitas produksi sebesar berturut-turut sekitar (dengan pembulatan ratusan) 2.300 mCi, 2.000 mCi, 1.800 mCi, 1.600 mCi dan 1.200 mCi atau berturut-turut sekitar 80%, 70%, 61%, 55% dan 41% bila dibandingkan dengan kapasitas produksi dari siklotron yang mempunyai energi berkas proton 18 MeV.

KESIMPULAN

Hasil prediksi *yield* aktivitas ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ untuk beberapa siklotron medik yang diperoleh secara teori menunjukkan bahwa semakin besar penggunaan energi berkas proton yaitu dari 7,5 MeV hingga 18 MeV, semakin tinggi pula *yield* radionuklida ^{18}F yang dihasilkan. Namun demikian untuk penggunaan energi yang lebih tinggi lagi *yield* radionuklida ini akan menurun berkenaan denganampang lintang reaksi nuklir dari pembentukan ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ yang optimal adalah pada energi 18 MeV. Lama selang waktu iradiasi dalam produksi radionuklida ini juga mempengaruhi *yield* radionuklida yang diperoleh, yaitu semakin lama waktu iradiasi yang digunakan akan semakin besar *yield* radionuklida yang diperoleh. Namun demikian nilai *yield* radionuklida tersebut akan

mendekati nilai jenuhnya (mendekati faktor 1) mana kala suku $e^{-\lambda \cdot t}$ semakin kecil, atau lama waktu iradiasi semakin panjang. Sehingga ada nilai batas waktu (lama iradiasi) tertentu hingga menjadikan produksi radionuklida ini sudah tidak efektif lagi. Kenaikan *yield* terhadap waktu yang paling efektif adalah untuk waktu iradiasi sampai dengan satu umur paro dari radionuklida yang bersangkutan. Kapasitas produksi ^{18}F dari reaksi $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ yang terbesar adalah yang dihasilkan oleh siklotron yang mempunyai energi berkas proton sebesar 18 MeV yang besarnya sekitar 2.900 mCi untuk arus berkas 40 μA dan lama iradiasi 1 jam. Sedang untuk siklotron yang mempunyai energi berkas berturut-turut 13 MeV, 11 MeV, 10 MeV, 9 MeV dan 7,5 MeV untuk kondisi operasi siklotron yang sama, yaitu untuk arus berkas 40 μA dan lama iradiasi 1 jam, mempunyai kapasitas produksi sebesar berturut-turut sekitar (dengan pembulatan ratusan) 2.300 mCi, 2.000 mCi, 1.800 mCi, 1.600 mCi dan 1.200 mCi atau berturut-turut sekitar 80%, 70%, 61%, 55% dan 41% bila dibandingkan dengan kapasitas produksi dari siklotron yang mempunyai energi berkas proton 18 MeV.

DAFTAR PUSTAKA

1. Charged Particle Cross Section Database for Medical Radioisotope Production, IAEA TECDOC-1211, IAEA, Vienna 2001.
2. **Cyclotron Produced Radionuclides: Guidelines for Setting Up a Facility**, Technical Reports Series no. 471, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009.
3. <http://www.isoflex.com/isotopes/o18.html>, diunduh pada 9 Oktober 2012.
4. **CARLOS GONZALEZ LEPERA**, "PET Radionuclides Production Cyclotron Selection and Location", Cyclotopes and Experimental Diagnostic Imaging, The University of Texas MD Anderson Cancer Center Houston, TX. www.aapm.org/meetings/08SS, diunduh pada 5 November 2012.
5. **MARCEL GUILLAME, et al.**, "Recommendations for Fluorine-18 Production", Appl. Radiat. Isot. Vol.42 No.8, pp 749-762, Inst. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A, Pergamon Press, Great Britain (1991).
6. **TIMOTHY J. TEWSON**, "Procedures, Pitfalls and Solutions in the Production of [^{18}F]2-Deoxy-2-fluoro-D-glucose: a Paradigm in the Routine Synthesis of Fluorine-18 Radiopharmaceuticals", Nucl. Med. Biol. Vol.16., pp. 533-551., Int.J.Radiat.Appl. Instrum., Part B, Pergamon Press, Great Britain (1989).
7. **H.H.COENEN, et al.**, "Recommendation for A Practical Production of [^{18}F] Fluoro-2-Deoxy-D-Glucose", Appl. Radiat. Isot. Vol.38 No.8, pp 608-610, Inst. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A, Pergamon Press, Great Britain (1987).
8. **JACKLIN, P.B., BARRINGTON, S.F., ROXBURG, J.C., JACKSON, J., SARIKLIS, D., WEST, P.A., AND MAISEY, M.N.** "Cost-effectiveness of preoperative positron emission tomography in ischemic heart disease", The Annals of Thoracic Surgery Vol.73., p.1403,(2002).