

KALKULASI PEMBENTUKAN RADIONUKLIDA PADA KOMPONEN SUMBER ION SIKLOTRON

Silakhuddin

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan Jakarta
e-mail: silakh@batan.go.id

Abstrak

Studi untuk memprediksi paparan radiasi pada akselerator partikel jenis siklotron yang diawali dengan tahapan perhitungan terbentuknya radionuklida pada komponen sumber ion telah dilakukan. Sasaran yang akan dicapai adalah teridentifikasi radionuklida-radionuklida yang terbentuk dan sebaran radius kebolehjadian terbentuknya pada komponen sumber ion. Metode penelitian adalah dengan identifikasi reaksi nuklir proton dengan bahan komponen sumber ion, menentukan hubungan antara energi ion sebagai fungsi radius yang kemudian dikonversi menjadi hubungan antara tampang lintang reaksi nuklir dengan radius dan mencari hubungan antara koefisien transmisi berkas ion sebagai fungsi radius. Kebolehjadian terbentuknya radionuklida diperoleh dengan mengalikan nilai tampang lintang reaksi dengan nilai koefisien transmisi pada radius tertentu. Hasil analisis menunjukkan bahwa ^{65}Zn dan ^{63}Zn adalah radionuklida yang cukup penting untuk diperhatikan radius beberapa centimeter menjelang radius ekstraksi adalah lokasi pembentukan maksimum yaitu sebesar relatif 100% pada radius 36 cm dan 38 cm.

Kata kunci: pembentukan radionuklida, siklotron, sumber ion

Abstract

This paper presents a prediction of radiation exposure on particle accelerator of cyclotron type that was began with calculation of radionuclides formation on ion source component has been done. The objectives of research are to identify the formation of radionuclides and probability of its radial distribution on ion source component. The methods of this research are to identify proton nuclear reaction with ion source component, determine of ion energy as radius function then converted to nuclear reaction cross section versus radius, and to determine the relation of ion beam transmission coefficient as function of radius. The probability of radionuclide formation can be determined with multiplying the reaction cross section and transmission coefficient on certain radius. The result showed that the ^{65}Zn and ^{63}Zn radionuclides are important to be considered at the radius of several centimeters towards the extraction radius which location at maximum yields of radionuclides formation of 100% relatively on the radius of 36 cm and 38 cm respectively.

Keywords: cyclotron, ion source, radionuclides formation

PENDAHULUAN

Suatu desain siklotron untuk produksi radioisotop memerlukan suatu kajian menyangkut segi keselamatan radiasi

yang ditimbulkan oleh adanya reaksi nuklir dari antara partikel penembak dengan komponen-komponen siklotron, komponen wadah target dan material target. Selain

komponen pemercepat *rf dee* dan magnet, sumber ion merupakan salah satu komponen siklotron yang penting. Komponen ini berada dalam suatu *vacuum chamber* atau dikenal dengan istilah tangki siklotron. Ion-ion dihasilkan oleh sumber ion kemudian adanya kombinasi tegangan listrik *rf* dari dua *dee* dan medan magnet maka ion-ion akan bergerak spiral. Selama gerakan spiral energi ion-ion bertambah terus sebagai fungsi kuadrat dari posisi radius. Lebar horizontal dan vertikal pada berkas ion dalam ukuran beberapa milimeter, dan ukuran lebar tersebut terus dijaga oleh sifat optik dari profil kutub magnet agar tidak menumbuk komponen-komponen siklotron selama gerakannya.

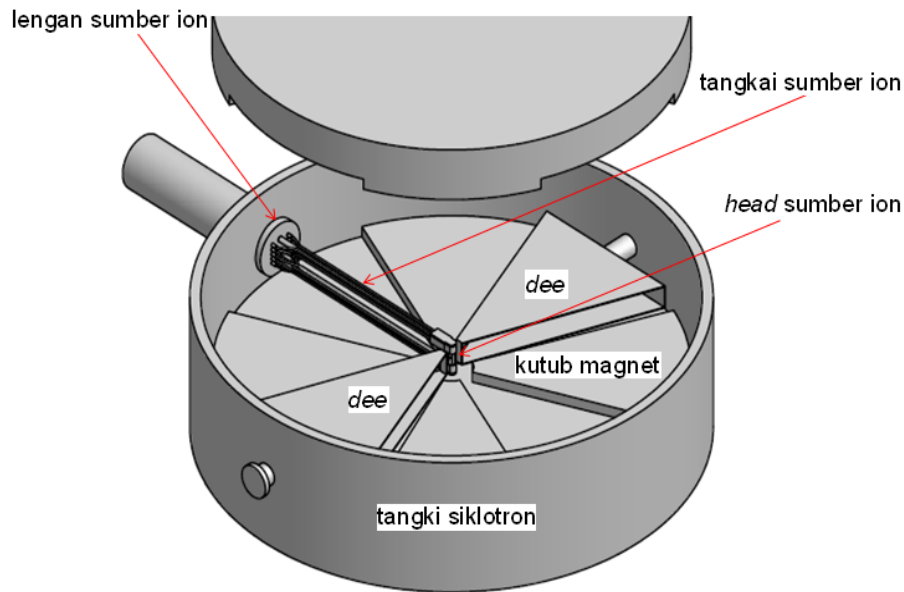
Sekalipun lintasan berkas ion sudah dijaga agar tidak menumbuk komponen-komponen siklotron, tetapi pada siklotron yang memercepat ion hidrogen negatif (H⁻), kehilangan sebagian berkas ion tak dapat dihindari akibat tumbukan dengan molekul-molekul gas residu selama pemercepatan siklik. Akibat tumbukan tersebut elektron dapat lepas dari ion dan ion menjadi atom H netral. Peristiwa ini dikenal sebagai *stripping* dan arus berkas ion akan berkurang yang dikenal dengan efek *stripping loss*. Efek ini akan dapat ditekan sekecil mungkin apabila kevakuman di dalam tangki dijaga setinggi mungkin. Selanjutnya, atom netral yang ter-

bentuk tersebut masih mempunyai energi yang bila menumbuk komponen sumber ion yaitu pada tangkai akan menimbulkan reaksi nuklir yang dapat menghasilkan radionuklida pada komponen tersebut. Sebagian dari radionuklida ini dapat berpotensi menghasilkan paparan radiasi gamma residu yang cukup berarti dan harus menjadi perhatian.

Sasaran estimasi adalah diperoleh pengetahuan tentang jenis radionuklida yang terbentuk dan sebaran lokasi terbentuknya yang akan sangat bermanfaat bagi keselamatan personel dalam perawatan siklotron. Dalam kaitan dengan kegiatan pembuatan dokumen desain rinci siklotron, suatu sub dokumen tentang analisis resiko keselamatan akan merupakan bagian kelengkapan dokumen tersebut. Analisis tentang kebolehjadian terbentuknya radionuklida ini akan merupakan bahan untuk kontribusi pembuatan sub dokumen analisis resiko keselamatan.

METODE PENELITIAN

Perangkat sumber ion dari suatu siklotron yang memercepat ion H⁻ negatif dengan energi hingga 13 MeV dan arus berkas 100 μ A pada *central region* (energi \sim 1 MeV) dan 40 μ A pada radius ekstraksi (13 MeV) akan menjadi objek kajian. Ilustrasi sumber ion dan penempatan di dalam tangki siklotron ditunjukkan pada Gambar 1. Ion-ion negatif hidrogen diproduksi oleh sumber



Gambar 1. Komponen Sumber Ion dan Penempatan dalam Tangki Siklotron

ion yang berada di pusat siklotron kemudian dipercepat oleh sistem *rf dee* dan dibuat gerakan spiral oleh medan magnet. Berkas ion yang berspiral melintas di antara tangkai atas dan bawah sumber ion. Semakin besar radius sirkulasi, energinya semakin besar dan mencapai energi maksimum pada radius ekstraksi di foil ekstraktor. Foil ekstraktor merubah ion negatif hidrogen menjadi proton, dan oleh medan magnet tepi akan dibelokkan ke arah target. Hal ini agar tidak mengganggu medan magnet, komponen sumber ion terbuat dari bahan non magnet, dalam hal ini dipakai tembaga.

Pada Gambar 1, posisi sumber ion memanjang dari *head* yang berada di daerah pusat dan tangkainya memanjang secara radial ke arah tepi dari tangki siklotron.

Besarnya persentase berkas ion yang hilang karena *stripping loss* sewaktu proses percepatan ditentukan oleh tingkat kevakuman di tangki siklotron (Zhang, 2009).

Dalam analisis ini diasumsikan bahwa kebolehjadian besarnya persentase sangkutan berkas ion atau koefisien transmisi sama seperti hasil pengamatan Parkhomchuk dkk., pada fasilitas CYCLON 18/9 buatan IBA yang beroperasi pada kevakuman 10^{-5} Torr dan data-data komponen dan operasi tidak jauh berbeda dengan siklotron 13 MeV yang sedang didesain. Data koefisien transmisi pada fasilitas tersebut ditunjukkan pada Tabel 1 (Parkhomchuk, 2012).

Energi atom netral H pada proses *stripping* ion H^- diasumsikan sama dengan

Tabel 1. Koefisien Transmisi Berkas Ion H⁺ pada Cyclotron sebagai Fungsi Energi H⁺

Energi, MeV	Koefisien transmisi, %	Energi, MeV	Koefisien transmisi, %	Energi, MeV	Koefisien transmisi, %
1	100	5,5	62	10	46
1,5	92	6	60	10,5	45
2	84	6,5	57	11	44
2,5	78	7	54	11,5	43
3	75	7,5	52	12	42
3,5	72	8	50	12,3	40
4	69	8,5	48	13	39
4,5	67	9	47		
5	85	9,5	46		

energi ion H⁺ pada waktu proses *stripping* yang terjadi pada suatu radius. Distribusi sudut arah pantulan H netral juga dianggap simetri vertikal dan horizontal.

Kelakuan reaksi nuklir H netral dianggap sama dengan kelakuan pada reaksi nuklir dari proton, hal ini karena reaksi nuklir menyangkut inti atom dan inti atom dari H netral adalah proton. Rapat molekul gas residu dianggap merata untuk semua nilai radius (Nuttens, 2010).

Analisis mengikuti prosedur sebagai berikut. Lokasi tumbukan dan jenis bahan komponen sumber ion yang kemungkinan dapat tertumbuk oleh atom H netral yang terjadi setelah proses *stripping* diidentifikasi.

Jenis reaksi nuklir yang terjadi antara proton dengan bahan penyusun komponen sumber ion diidentifikasi dalam jangkauan energi ion 0 hingga 13 MeV. Reaksi nuklir antara proton dengan bahan dapat disimpulkan

dengan notasi reaksi (p,x) . Untuk energi proton di bawah 13 MeV, x dapat berupa n , $2n$, $2p$ dan $(p+n)$. Untuk menentukan terjadinya reaksi nuklir terlebih dahulu dihitung energi ambang melalui formulasi yang sudah dikenal tentang energi ambang E_{th} menurut persamaan 1 (Serway, 2005).

$$E_{th} = [(M_{out} + M_1 + M_2) \times \frac{M_{out} - M_1 - M_2}{(2M_1)}] \times c^2 \quad (1)$$

M_{out} merupakan jumlah massa partikel keluar, M_1 massa nuklida target, M_2 massa partikel datang (dalam kasus ini proton) dan C kecepatan cahaya.

Reaksi nuklir dengan energi ambang di atas 10 MeV akan diabaikan dalam identifikasi karena hingga energi 13 MeV reaksi nuklir tersebut akan mempunyai tampang lintang reaksi yang masih kecil.

Reaksi-reaksi nuklir yang sudah teridentifikasi tersebut kemudian dicari nilai tampang lintang reaksi untuk energi hingga 13 MeV. Data tampang lintang reaksi diperoleh

dari program EXFOR (Zerkin, 2013). Nilai tampang lintang reaksi tersebut dibuat tabulasi terhadap nilai energi partikel, diusahakan didapat data untuk setiap spasi 0,5 MeV.

Energi ion E sebagai fungsi radius (r) siklik di dalam siklotron dengan persamaan (2).

$$E = \frac{q^2 B^2 r^2}{2m} \quad (2)$$

dengan q adalah muatan listrik ion hidrogen H^{-1} , B intensitas medan magnet dan m massa ion H^{-1} .

Jika dimasukkan nilai-nilai $q \equiv 1,6 \times 10^{-19}$ coulomb dan $m \equiv 1,67 \times 10^{-27}$ kg maka persamaan (2) dapat ditulis dalam bentuk

$$E = 0,48 \times B^2 \times r^2 \quad (3)$$

atau

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{E}{0,48}} \quad (4)$$

dengan E dalam MeV, B dalam kG dan r dalam m.

Persamaan (4) dibuat tabulasi antara radius dengan energi untuk setiap 0,5 MeV.

Nilai-nilai energi hasil tabulasi pada 3 dikonversi menjadi nilai-nilai radius hasil tabulasi pada 4, hasil akhirnya berupa tabulasi antara nilai tampang lintang reaksi dengan nilai radius untuk setiap reaksi nuklir yang sudah teridentifikasi.

Nilai-nilai energi hasil tabulasi pada Tabel 3 digabungkan dengan hasil tabulasi

pada Tabel 1, sehingga dihasilkan tabulasi hubungan antara koefisien transmisi sebagai fungsi radius.

Oleh karena besarnya kebolehjadian terbentuk radionuklida bukan saja tergantung energi tetapi juga besar arus ion maka nilai kebolehjadian tersebut ditentukan dengan cara mengalikan tampang lintang reaksi hasil tabulasi pada Tabel 5 dengan besarnya koefisien transmisi untuk setiap radius hasil tabulasi 6. Hasil akhir berupa tabulasi antara nilai kebolehjadian terbentuknya sesuatu radionuklida sebagai fungsi radius yang memberikan sebaran kebolehjadian terbentuknya radionuklida di sepanjang komponen sumber ion.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan mengamati skema penempatan sumber ion pada siklotron seperti ditunjukkan pada Gambar 1, kebolehjadian atom H netral yang lepas dari gerakan spiral berkas ion akan menumbuk bagian tangkai atas dan bawah. Arah hamburan atom tersebut setelah *stripping* akan ke segala penjuru. Analisis distribusi hamburan sebenarnya dapat disimulasikan dengan program Monte Carlo (Moses *et al*, 1985), tetapi karena dalam estimasi ini hanya akan ditentukan nilai kebolehjadian relatif maka hanya akan dipandang bahwa persentase

atom netral yang menumbuk tangkai atas sama dengan yang menumbuk tangkai bawah. Jenis bahan tangkai adalah tembaga, yang secara alami terdiri atas dua nuklida yaitu ^{63}Cu dan ^{65}Cu masing-masing dengan kelimpahan 69,17% dan 30,83% (Yang, 2004).

Reaksi nuklir yang mungkin dari reaksi proton dengan kedua nuklida tersebut ditunjukkan dalam Tabel 2.

Dari Tabel 2 ada lima radionuklida yang terbentuk yaitu ^{63}Zn , ^{62}Zn , ^{62}Cu , ^{65}Zn dan ^{64}Cu . Energi proton penembak hanya 13 MeV maka radionuklida-radionuklida yang dalam pembentukannya diperlukan energi ambang lebih besar dari 10 MeV akan diabaikan, hal ini karena tampang lintangnya masih sangat kecil hingga energi 13 MeV. Oleh sebab itu tinggal dua radionuklida yang akan dibahas yaitu ^{63}Zn dan ^{65}Zn , masing-masing melalui reaksi $^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$ dan $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$. Produk radionuklida ^{63}Zn berasal dari reaksi dengan tampang lintang

yang lebih tinggi dibanding ^{65}Zn tetapi berasal dari nuklida dengan kelimpahan yang lebih kecil, jadi keduanya kira-kira mempunyai *yield* yang hampir sama di saat tepat setelah terjadinya reaksi nuklir. Akan tetapi, karena umur paro dari ^{63}Zn yang hanya 0,65 jam dibandingkan ^{65}Zn yang hingga 5856 jam atau 244 hari, maka paparan radiasi dari ^{63}Zn menjadi kurang penting.

Data tampang lintang reaksi untuk pembentukan ^{65}Zn dan ^{63}Zn yang diekstrak dari program EXFOR yang dibuat oleh IAEA (Zerkin, 2013) dan Yang (Yang, 2004) ditunjukkan pada Tabel 3.

Untuk menentukan besar radius yang bersesuaian energi partikel setiap langkah 0,5 MeV, digunakan persamaan (4) dengan memasukkan besaran magnet yang digunakan pada DECY 13 yaitu $B=12,75$ kgauss; hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.

Dengan menggabungkan data pada Tabel 3 dan 4 diperoleh tabulasi dari

Tabel 2. Data Reaksi Proton dengan *Cu*

Nuklida target	Jenis reaksi	Energi ambang	Nuklida hasil/umur paro(Yang, 2004)
^{63}Cu	(p,n)	4,215 MeV	$^{63}\text{Zn}/0,65$ jam
	(p,2n)	13,475 MeV	$^{62}\text{Zn}/9,3$ jam
	(p,2p)	6,221 MeV	$^{62}\text{Ni}/\text{stabil}$
	(p,n+p)	11,028 MeV	$^{62}\text{Cu}/0,165$ jam
^{65}Cu	(p,n)	2.168 MeV	$^{65}\text{Zn}/5856$ jam
	(p,2n)	10,272 MeV	$^{64}\text{Zn}/\text{stabil}$
	(p,2p)	7,569 MeV	$^{64}\text{Ni}/\text{stabil}$
	(p,n+p)	10,065 MeV	$^{64}\text{Cu}/12,9$ jam

Tabel 3. Data Tampang Lintang Reaksi $^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$ dan $^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$ sebagai Fungsi Energi

Energi proton, MeV	Tampang lintang reaksi, milibarn		Energi proton, MeV	Tampang lintang reaksi, milibarn	
	$^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$	$^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$		$^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$	$^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$
0,5	0	0	7	480	250
1	0	0	7,5	510	280
1,5	0	0	8	540	310
2	0	0	8,5	590	340
2,5	0	0	9	640	360
3	20	0	9,5	670	400
3,5	60	0	10	700	410
4	100	0	10,5	730	420
4,5	140	20	11	730	440
5	220	80	11,5	700	460
5,5	320	150	12	620	460
6	400	190	12,5	580	460
6,5	440	220	13	500	460

Tabel 4. Radius Lintasan Ion Bersesuaian dengan Energi

Energi ion, (MeV)	Radius ion, (m)	Energi ion, (MeV)	Radius ion, (m)
0,5	0,080	7	0,300
1	0,113	7,5	0,310
1,5	0,139	8	0,320
2	0,160	8,5	0,330
2,5	0,180	9	0,340
3	0,196	9,5	0,349
3,5	0,212	10	0,358
4	0,226	10,5	0,367
4,5	0,240	11	0,375
5	0,253	11,5	0,384
5,5	0,265	12	0,392
6	0,277	12,5	0,400
6,5	0,289	13	0,408

tampang lintang reaksi sebagai fungsi radius untuk reaksi-reaksi pembentukan ^{65}Zn dan ^{63}Zn seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Kombinasi antara Tabel 1 dan Tabel 4 akan dihasilkan suatu tabulasi hubungan antara koefisien transmisi berkas ion sebagai fungsi radius, hasilnya tercantum pada Tabel 6.

Nilai relatif kebolehjadian terbentuknya suatu radionuklida di suatu radius diperoleh dengan mengalikan koefisien transmisi berkas ion (Tabel 6) denganampang lintang reaksi pembentukan radionuklida pada radius tersebut (Tabel 5). Untuk nilai relatif kebolehjadian sebesar 1 pada nilai terbesar,

Tabel 5. Data Tampang Lintang Reaksi Fungsi Radius

Radius, (m)	Tampang lintang reaksi, mb		Radius, (m)	Tampang lintang reaksi, mb	
	$^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$	$^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$		$^{65}\text{Cu}(p,n)^{65}\text{Zn}$	$^{63}\text{Cu}(p,n)^{63}\text{Zn}$
0,080	0	0	0,300	480	250
0,113	0	0	0,310	510	280
0,139	0	0	0,320	540	310
0,160	0	0	0,330	590	340
0,180	0	0	0,340	640	360
0,196	20	0	0,349	670	400
0,212	60	0	0,358	700	410
0,226	100	0	0,367	730	420
0,240	140	20	0,375	730	440
0,253	220	80	0,384	700	460
0,265	320	150	0,392	620	460
0,277	400	190	0,400	580	460
0,289	440	220	0,408	500	460

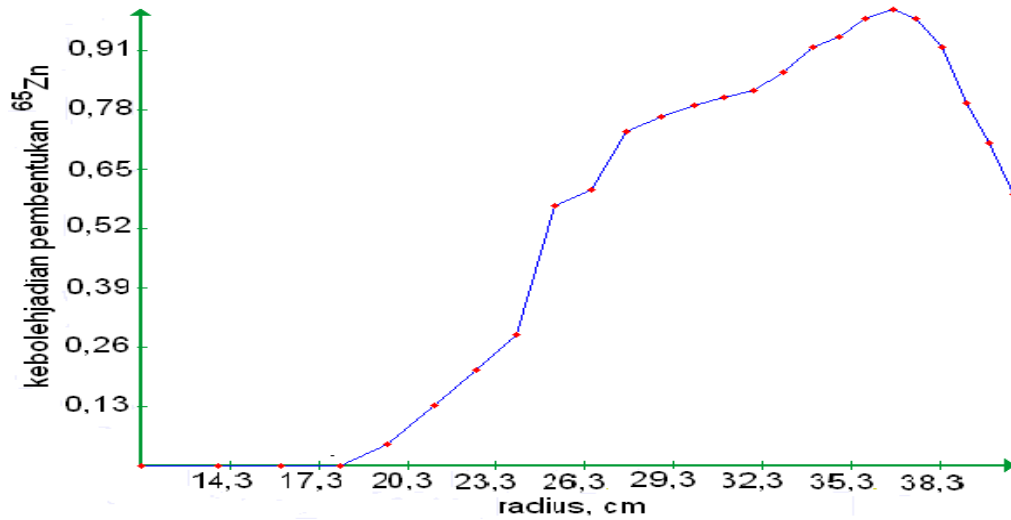
Tabel 6. Besar Koefisien Transmisi Berkas Ion sebagai Fungsi Radius

Radius, (m)	Koefisien transmisi,%	Radius, (m)	Koefisien transmisi, %	Radius, (m)	Koefisien transmisi, %
0,113	100	0,253	85	0,340	47
0,139	92	0,265	62	0,349	46
0,160	84	0,277	60	0,358	46
0,180	78	0,289	57	0,367	45
0,196	75	0,300	54	0,375	44
0,212	72	0,310	52	0,384	43
0,226	69	0,320	50	0,392	42
0,240	67	0,330	48	0,400	40
				0,408	39

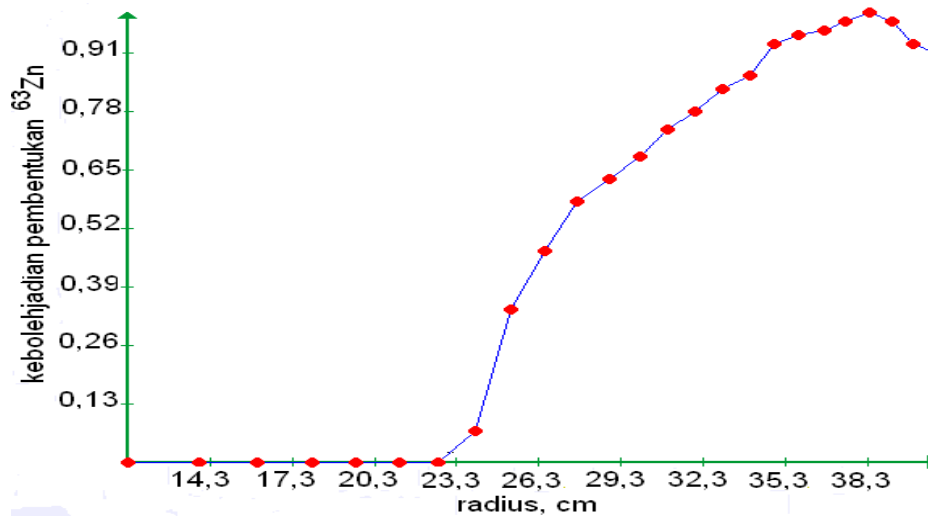
data dari nilai-nilai tersebut adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 masing-masing untuk pembentukan radionuklida ^{65}Zn dan ^{63}Zn .

Gambar 2 menunjukkan bahwa puncak pembentukan ^{65}Zn mulai terlihat pada radius 20 cm pada nilai 5% dari puncak kemudian naik dan mencapai maksimum pada kira-kira 36 cm kemudian menurun kembali hingga nilai 60% pada radius

ekstraksi. Pembentukan ^{63}Zn mulai terjadi pada radius 24 cm terus naik hingga nilai maksimum pada radius 38 cm dan kemudian turun sedikit menuju radius ekstraksi. Waktu paro ^{63}Zn hanya 38 menit sehingga beberapa jam setelah operasi efek radiasinya tidak cukup penting. ^{65}Zn waktu paronya hingga 244 hari sehingga efek radiasi residu dari radionuklida ini penting untuk diperhitungkan, dan lokasi yang perlu diberi



Gambar 2a. Distribusi Kebolehjadian Pembentukan ^{65}Zn



Gambar 2b. Distribusi Kebolehjadian Pembentukan ^{63}Zn

perhatian adalah daerah menjelang radius ekstraksi.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan dari pembentukan radionuklida pada komponen sumber ion

menunjukkan bahwa radionuklida yang terbentuk adalah ^{65}Zn dan ^{63}Zn yang terjadi pada tangkai sumber ion. Lokasi yang harus menjadi perhatian terhadap efek radiasi residu adalah daerah menjelang radius ekstraksi tepatnya adalah pada sekitar radius

36 cm. Kontribusi radionuklida ^{65}Zn pada efek radiasi residu penting untuk diperhatikan karena umur paronya hingga 244 hari.

Daftar Pustaka

- Moses, J.D., Holtkamp, D., King, J.D., Lisowski, P.W., Simmons, J.E. 1985. *The angular distribution of neutral hydrogen following collisional electron detachment from H⁻*, Publication No. La-10326-MS DE85 014258. Los Alamos National Laboratory USA.
- Nuttens, V., Abs, M., Delvaux, J.L. 2010. Cyclotron Vacuum Model and H⁻ Gas Stripping Losses. *Proceedings of CYCLOTRONS 2010*, Lanzhou, China.
- Parkhomchuk, V., Papash, A. 2012. 8 MeV H⁻ Cyclotron To Charge Electron Cooling System for HECR, http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/r06/TALKS/TUEO03_TALK.PDF, diakses pada Maret 2012.
- Serway, R.A., Moses, C.J., Moyer, C.A. 2005. *Modern physics*. Thomson Learning, Inc, third edition.
- Yang, J.M., McKenna, P., Ledingham, K.W.D. 2004. Nuclear reactions in copper induced by protons from a petawatt laser-foil interaction, *Applied Physics Letters*. Vol. 84, no. 5.
- Zerkin, V. 2013. *Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)*. Database Version of February 26, 2013, IAEA.
- Zhang, T., Zhong, J., Wang, J. 2009. Beam Loss By Lorentz Stripping and Vacuum Dissociation in a 100 MeV Compact H⁻ Cyclotron. *Proceedings of 23rd Particle Accelerator*.