

## KAJIAN PEMBUATAN SUMBER RADIASI IRIDIUM-192 UNTUK RADIOTERAPI LAJU DOSIS TINGGI

Rohadi Awaludin

Pusat Pengembangan Radioisotop dan Radiofarmaka, BATAN

### ABSTRAK

**KAJIAN PEMBUATAN SUMBER RADIASI IRIDIUM-192 UNTUK RADIOTERAPI LAJU DOSIS TINGGI.** Telah dilakukan kajian tentang radioaktivitas yang diperoleh dalam proses produksi  $^{192}\text{Ir}$  untuk radioterapi laju dosis tinggi. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa  $^{192}\text{Ir}$  sebesar 10 Ci dapat diperoleh dari sasaran iridium seberat 23,5 mg dengan waktu iradiasi masing-masing selama 1019, 463 dan 224 jam untuk fluks neutron setinggi  $5 \times 10^{13}$ ,  $1 \times 10^{14}$  dan  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ , sedangkan sasaran seberat 25,5 mg memerlukan waktu iradiasi selama 910, 419 dan 203 jam untuk masing-masing fluks neutron yang sama. Apabila reaktor beroperasi dengan siklus 12 hari operasi dan 16 hari *shut down*, sasaran iridium seberat 25,5 mg akan menghasilkan  $^{192}\text{Ir}$  dengan radioaktivitas 6,76, 13,51 dan 25,10 Ci untuk fluks neutron  $5 \times 10^{13}$ ,  $1 \times 10^{14}$  dan  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$  selama 2 periode iradiasi. Di dalam proses produksi ini, pengotor radionuklida yang dihasilkan adalah  $^{194}\text{Ir}$  dengan waktu paro 19,15 jam yang segera meluruh dalam waktu relatif singkat setelah iradiasi.

Kata kunci : Iridium-192, radioterapi laju dosis tinggi

### ABSTRACT

**STUDY ON PRODUCTION OF IRIDIUM-192 SOURCES FOR HIGH DOSE RATE RADIOTHERAPY.** Study of the radioactivity resulted on production process of the  $^{192}\text{Ir}$  sources for high dose rate radiotherapy has been carried out. It was obtained that 10 Ci of  $^{192}\text{Ir}$  could be produced from 23.5 mg of Iridium with irradiation time as long as 1019, 463 and 224 hours for neutron flux of  $5 \times 10^{13}$ ,  $1 \times 10^{14}$  and  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$  respectively while in the case of 25.5 mg of Iridium target, the irradiation times were 910, 419 and 203 hours for the same neutron flux. If the reactor was operated with cycles of 12 days up and 16 days down, the resulting radioactivities were 6.76, 13.51 and 25.10 Ci for neutron flux as high as  $5 \times 10^{13}$ ,  $1 \times 10^{14}$  and  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$  for 2 periods of irradiation. In this production process, the radionuclide impurity was  $^{194}\text{Ir}$  with half life of 19.15 hours that will decay in a relatively short time after irradiation.

Key words: Iridium-192, high dose rate radiotherapy

## PENDAHULUAN

Dari waktu ke waktu penggunaan radioisotop untuk terapi (radioterapi) semakin meningkat. Dalam skala internasional, jumlah pemakaian radioisotop untuk terapi telah melebihi nilai 70 juta US\$ dan terus menunjukkan kecenderungan naik setiap tahunnya. Radioterapi dimulai dengan penggunaan radium-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) untuk terapi kanker. Penggunaan radioisotop ini dihentikan setelah diketahui bahwa  $^{226}\text{Ra}$  menghasilkan gas radioaktif radon-222, nuklida anak  $^{226}\text{Ra}$ , yang sulit ditangani dan dapat menimbulkan efek samping. Setelah itu, berbagai jenis sumber radiasi dikembangkan untuk penanganan kanker seperti iridium-192 ( $^{192}\text{Ir}$ ), emas-198 ( $^{198}\text{Au}$ ), itrium-90 ( $^{90}\text{Y}$ ), fosfor-32 ( $^{32}\text{P}$ ), iodium-125 ( $^{125}\text{I}$ ) dan paladium-103 ( $^{103}\text{Pd}$ ) [1].

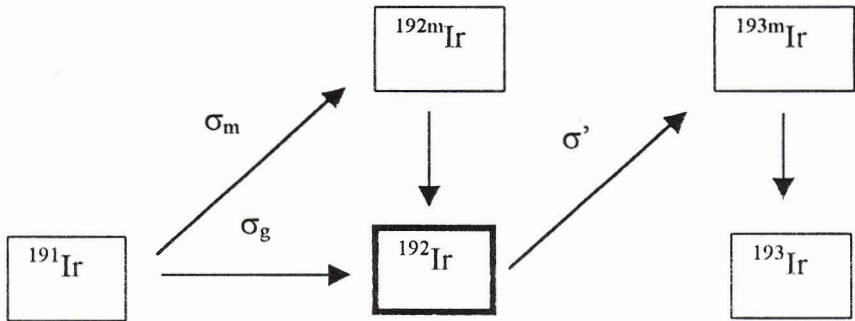
Dari beberapa jenis radionuklida tersebut,  $^{192}\text{Ir}$  merupakan radionuklida yang saat ini banyak digunakan. Radionuklida ini memiliki waktu paro 73,83 hari, memancarkan radiasi beta dengan energi maksimum 675 KeV serta radiasi gamma dengan energi 317 keV dengan intensitas tertinggi (82,8%). Radioterapi menggunakan sumber  $^{192}\text{Ir}$  dapat dibagi menjadi 3 berdasarkan besarnya laju dosis yang diberikan, yaitu radioterapi laju dosis rendah, menengah dan tinggi. Besarnya laju dosis yang diberikan sebesar 0,40 - 2 Gy/jam untuk laju dosis rendah, di atas 12 Gy/jam untuk laju dosis tinggi dan di antara keduanya untuk laju dosis menengah. Pada laju dosis rendah, sumber radiasi yang digunakan memiliki radioaktivitas puluhan milicurie sedangkan pada laju dosis tinggi mencapai 8-10 Curie [1,2].

Radioterapi laju dosis tinggi mendapat perhatian besar karena memberikan kemudahan kepada pasien berupa singkatnya waktu penanganan. Namun karena tingginya radioaktivitas sumber yang digunakan, perluasan pemanfaatannya mengalami beberapa kendala. Salah satu kendala tersebut adalah penyediaan sumber dengan radioaktivitas yang besar dan berukuran kecil. Dengan kata lain, sumber harus memiliki radioaktivitas jenis yang sangat tinggi. Pada makalah ini dikaji parameter-parameter proses produksi yang digunakan sehingga dapat menghasilkan sumber yang memenuhi persyaratan dari sisi radioaktivitas. Kajian ini diharapkan dapat menjadi acuan awal dalam pengembangan proses produksi sumber radiasi untuk radioterapi laju dosis tinggi.

## TEORI

Radionuklida  $^{192}\text{Ir}$  dibuat dari  $^{191}\text{Ir}$  dengan reaksi penangkapan neutron ( $n,\gamma$ ). Reaksi produksi tersebut agak rumit karena ada dua jenis reaksi dari  $^{191}\text{Ir}$ , yaitu reaksi langsung menghasilkan  $^{192}\text{Ir}$  dan reaksi melalui radionuklida metastabil  $^{192m}\text{Ir}$ .

Di samping itu ada pula reaksi  $(n,\gamma)$  dari  $^{192}\text{Ir}$  yang telah terbentuk menjadi isotop stabil  $^{193}\text{Ir}$ . Gambaran reaksi yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Reaksi pada produksi  $^{192}\text{Ir}$ .

Dari skema reaksi yang ditunjukkan pada Gambar 1, jumlah  $^{192}\text{Ir}$  yang terbentuk tiap satuan waktu merupakan penjumlahan besarnya laju reaksi  $^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$  dan laju peluruhan  $^{192\text{m}}\text{Ir}$  dikurangi besarnya laju peluruhan  $^{192}\text{Ir}$  dan laju reaksi  $^{192}\text{Ir}(n,\gamma)^{193}\text{Ir}$ . Besarnya nilai tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$dN_{\text{Ir-192}}/dt = N_{\text{Ir-191}}\sigma_g \phi + N_{\text{Ir-192m}}\lambda_{\text{Ir-192m}} - N_{\text{Ir-192}}\sigma' \phi - \lambda N_{\text{Ir-192}} \dots \quad (1)$$

dimana,

- $dN_{\text{Ir-192}}/dt$  : Jumlah radionuklida  $^{192}\text{Ir}$  yang terbentuk tiap satuan waktu (atom/s)
- $N_{\text{Ir-191}}$  : Jumlah atom sasaran  $^{191}\text{Ir}$  (atom)
- $\sigma_g$  : Tampang lintang reaksi  $^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$  (barn =  $10^{-24}\text{cm}^2$ )
- $\phi$  : Fluks neutron ( $\text{ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ )
- $N_{\text{Ir-192m}}$  : Jumlah atom  $^{192\text{m}}\text{Ir}$  (atom)
- $\lambda_{\text{Ir-192m}}$  : Koefisien peluruhan  $^{192\text{m}}\text{Ir}$  ( $\text{s}^{-1}$ )
- $\sigma'$  : Tampang lintang reaksi  $^{192}\text{Ir}(n,\gamma)^{193}\text{Ir}$  (barn =  $10^{-24}\text{cm}^2$ )
- $\lambda$  : Konstanta peluruhan  $^{192}\text{Ir}$  ( $\text{s}^{-1}$ )

Radionuklida metastabil  $^{192\text{m}}\text{Ir}$  memiliki waktu paro yang sangat pendek (1,45 menit). Oleh karenanya, jumlah atom yang terbentuk segera mencapai titik jenuh dalam waktu singkat. Dalam keadaan ini, jumlah atom yang terbentuk sama dengan jumlah atom yang meluruh tiap satuan waktu, atau dapat dinyatakan dengan persamaan,

$$N_{\text{Ir-192m}}\lambda_{\text{Ir-192m}} = N_{\text{Ir-191}}\sigma_m\phi \dots \dots \dots \quad (2)$$

Di dalam persamaan 2,  $\sigma_m$  menyatakanampang lintang reaksi  $^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192m}\text{Ir}$ . Dari persamaan 1 dan persamaan 2 dapat diperoleh persamaan:

$$dN_{\text{Ir-192}}/dt = N_{\text{Ir-191}}\sigma_g\phi + N_{\text{Ir-191}}\sigma_m\phi - N_{\text{Ir-192}}\sigma'\phi - \lambda N_{\text{Ir-192}} \dots \dots \dots ] \dots \dots \quad (3)$$

$$dN_{\text{Ir-192}}/dt = N_{\text{Ir-191}}(\sigma_g + \sigma_m)\phi - N_{\text{Ir-192}}\sigma'\phi - \lambda N_{\text{Ir-192}} \dots \dots \dots \quad (4)$$

Jika persamaan 4 diselesaikan dan  $\sigma_g + \sigma_m = \sigma$ , diperoleh persamaan sebagai berikut [3]:

$$N_{\text{Ir-192}} = \frac{N_{\text{Ir-191}} \sigma \phi}{\lambda + \sigma' \phi} (1 - e^{-(\lambda + \sigma' \phi) t}) \dots \dots \dots \quad (5)$$

Besarnya radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  dapat dinyatakan dengan  $N_{\text{Ir-192}}\lambda$ , sehingga besarnya radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$A_{\text{Ir-192}} = \frac{N_{\text{Ir-191}} \sigma \phi}{1 + \sigma' \phi / \lambda} (1 - e^{-(\lambda + \sigma' \phi) t}) \dots \dots \dots \quad (6)$$

Unsur iridium di alam tersusun dari dua jenis isotop yaitu  $^{191}\text{Ir}$  dan  $^{193}\text{Ir}$  dengan kelimpahan masing-masing sebesar 37,3% dan 62,7%. Oleh karenanya, selain reaksi utama pembentukan  $^{192}\text{Ir}$ , terjadi pula reaksi penangkapan neutron (n,γ) dari  $^{193}\text{Ir}$ . Reaksi ini menghasilkan  $^{194}\text{Ir}$  dengan waktu paro selama 19,15 jam denganampang lintang reaksi sebesar 111 barn. Besarnya radioaktivitas yang dihasilkan dapat dinyatakan dengan persamaan berikut [2]:

$$A_{\text{Ir-194}} = N_{\text{Ir-193}}\sigma_{\text{Ir-194}}\phi (1 - \exp(-\lambda_{\text{Ir-194}}t)) \dots \dots \dots \quad (7)$$

dengan :

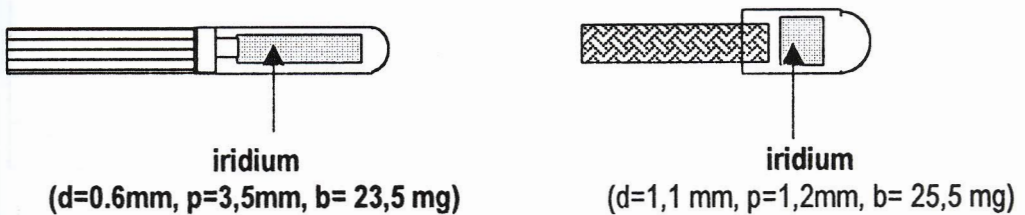
- $A_{\text{Ir-194}}$  : Radioaktivitas  $^{194}\text{Ir}$  (Bq)
- $N_{\text{Ir-193}}$  : Jumlah atom  $^{193}\text{Ir}$  (atom)
- $\sigma_{\text{Ir-193}}$  : Tampang lintang reaksi  $^{193}\text{Ir}(n,\gamma)^{194}\text{Ir}$  (barn)
- $\phi$  : Fluks neutron ( $\text{ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ )
- $\lambda_{\text{Ir-194}}$  : Konstanta peluruhan  $^{194}\text{Ir}$  ( $\text{s}^{-1}$ )
- $t$  : Waktu iradiasi (s)



## TATA KERJA

Di dalam kajian ini, perhitungan radioaktivitas dilakukan menggunakan software Microsoft Excel 2000. Kurva didapatkan dengan menghubungkan titik-titik hasil perhitungan. Radioaktivitas, waktu iradiasi dan nilai-nilai lain yang dikehendaki dapat diperoleh dari tabel hasil perhitungan di dalam software tersebut.

Saat ini di Jepang diproduksi 2 jenis sumber radiasi  $^{192}\text{Ir}$  untuk terapi laju dosis tinggi. Gambaran bentuk kedua jenis sumber tersebut seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Keduanya berbentuk silinder dengan ukuran diameter 0,6 mm dan panjang 3,5 mm serta diameter 1,1 mm dan panjang 1,2 mm. Berat Iridium di dalam sumber masing-masing sebesar 23,5 dan 25,5 mg[4].



Gambar 2. Bentuk sumber radiasi  $^{192}\text{Ir}$  untuk radioterapi dosis tinggi [4]

Didalam kajian ini, perhitungan radioaktivitas didasarkan pada sasaran iridium dengan berat 23,5 mg dan 25,5 mg seperti di atas. Parameter lain yang digunakan dalam perhitungan ditunjukkan pada Tabel 1.

Perhitungan pertama adalah perhitungan besar radioaktivitas yang diperoleh apabila sasaran iridium diiradiasi dalam waktu yang lama selama 50 hari atau 1200 jam. Perhitungan dilakukan untuk 3 jenis fluks neutron yaitu sebesar  $5 \times 10^{13}$ ,  $1 \times 10^{14}$  dan  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ . Pemilihan 3 jenis fluks neutron ini didasarkan pada besarnya fluks neutron yang dimiliki oleh reaktor riset yang ada di tanah air [5,6]. Pada perhitungan ini dicari pula waktu iradiasi yang diperlukan untuk mendapatkan radioaktivitas sebesar 10 Ci, karena besar radioaktivitas yang dibutuhkan oleh sumber untuk radioterapi dosis tinggi berada pada kisaran angka ini.

Perhitungan kedua dilakukan untuk menghitung radioaktivitas yang diperlukan disesuaikan dengan siklus operasi reaktor GA Siwabessy P2TRR BATAN. Reaktor GA Siwabessy dioperasikan dengan siklus 12 hari operasi dan 16 hari *shut down*[6]. Perhitungan dilakukan untuk dua kali waktu iradiasi dengan diselingi peluruhan selama 16 hari.

Tabel 1. Besaran yang digunakan dalam perhitungan radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  [2].

Parameter	Besaran
Berat sasaran	23,5 dan 25,5 mg
Kelimpahan $^{191}\text{Ir}$	37,3 %
Tampang lintang $^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192}\text{Ir}$	309 barn
Tampang lintang $^{191}\text{Ir}(n,\gamma)^{192m}\text{Ir}$	645 barn
Tampang lintang $^{192}\text{Ir}(n,\gamma)^{193}\text{Ir}$	1400 barn
Tampang lintang $^{193}\text{Ir}(n,\gamma)^{194}\text{Ir}$	111 barn
Fluks neutron	$5 \times 10^{13}$ , $1 \times 10^{14}$ , $2 \times 10^{14}$ $\text{ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$
Waktu paro $^{192}\text{Ir}$	73,83 hari
Waktu paro $^{192m}\text{Ir}$	1,45 menit
Waktu paro $^{194}\text{Ir}$	19,15 jam

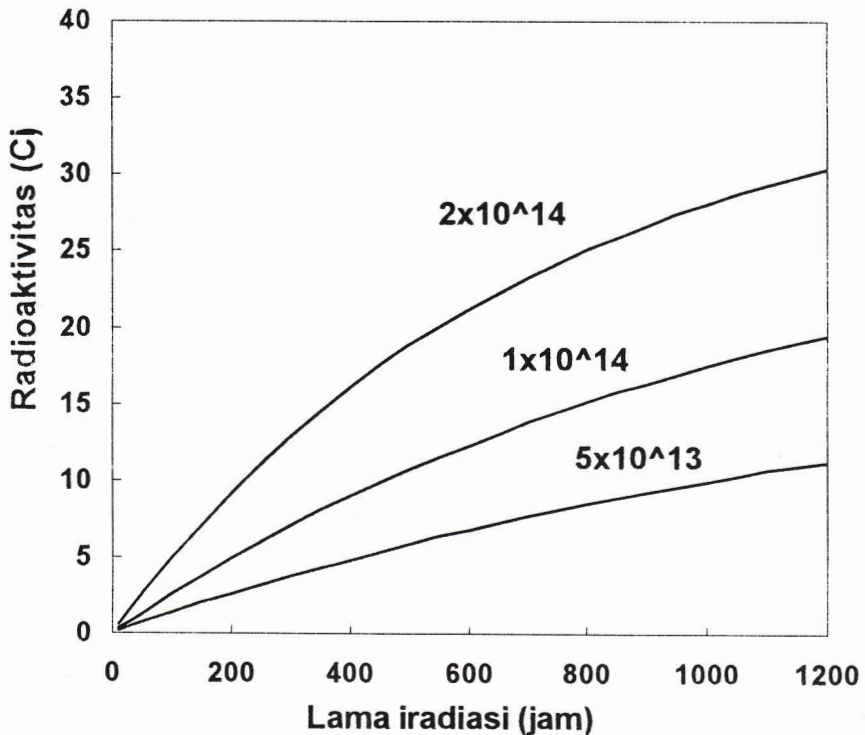
Perhitungan ketiga dilakukan untuk mengetahui besarnya radioaktivitas dari radionuklida pengotor  $^{194}\text{Ir}$  yang terbentuk dari  $^{193}\text{Ir}$  yang ada di dalam iridium alam. Isotop  $^{193}\text{Ir}$  memiliki kelimpahan sebesar 62,7% denganampang lintang reaksi sebesar 111 barn, sedangkan radionuklida  $^{194}\text{Ir}$  yang dihasilkan memiliki waktu paro 19,15 jam. Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan 7 [7].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

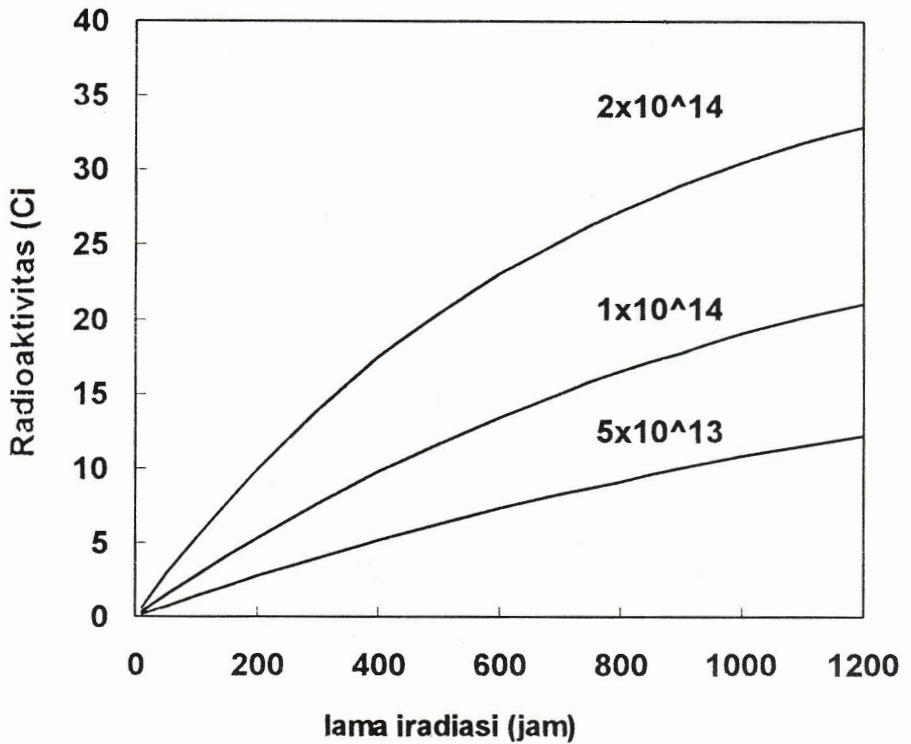
Hasil perhitungan besarnya radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  yang diperoleh sebagai fungsi waktu iradiasi ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4. Gambar 3 menunjukkan radioaktivitas yang diperoleh untuk sasaran iridium seberat 23,5 mg sedangkan Gambar 4 menunjukkan hasil untuk sasaran seberat 25,5 mg. Dari gambar tersebut diketahui bahwa iradiasi selama 1200 jam atau 50 hari perolehan radioaktivitas menunjukkan kenaikan dengan laju yang tinggi. Setelah melewati 1200 jam pun, radioaktivitas yang diperoleh masih terus naik sejalan dengan waktu iradiasi karena masih jauh dari radioaktivitas jenuh. Hal ini mudah difahami karena  $^{192}\text{Ir}$  memiliki waktu paro yang panjang (73,83 hari).

Apabila dikehendaki  $^{192}\text{Ir}$  dengan radioaktivitas 10 mCi, maka waktu iradiasi yang diperlukan untuk masing-masing sumber adalah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Untuk sasaran seberat 23,5 mg, waktu iradiasi yang diperlukan masing-masing selama 1019, 463 dan 224 jam untuk fluks neutron sebesar  $5 \times 10^{13}$ ,  $1 \times 10^{14}$  dan  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ . Sedangkan untuk sasaran 25,5 mg memerlukan waktu iradiasi masing-masing 910, 419 dan 203 jam untuk fluks neutron yang sama.

Waktu iradiasi untuk sasaran 25,5 mg sedikit lebih pendek dibandingkan dengan waktu iradiasi untuk sasaran 23,5 mg bersesuaian dengan fenomena bahwa radioaktivitas yang dihasilkan pada iradiasi dalam waktu tertentu berbanding lurus dengan jumlah atom atau massa sasaran.



Gambar 3. Hubungan waktu iradiasi dengan radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  yang diperoleh untuk sasaran seberat 23,5 mg. Angka di atas kurva menunjukkan besarnya fluks neutron dalam  $\text{ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ .



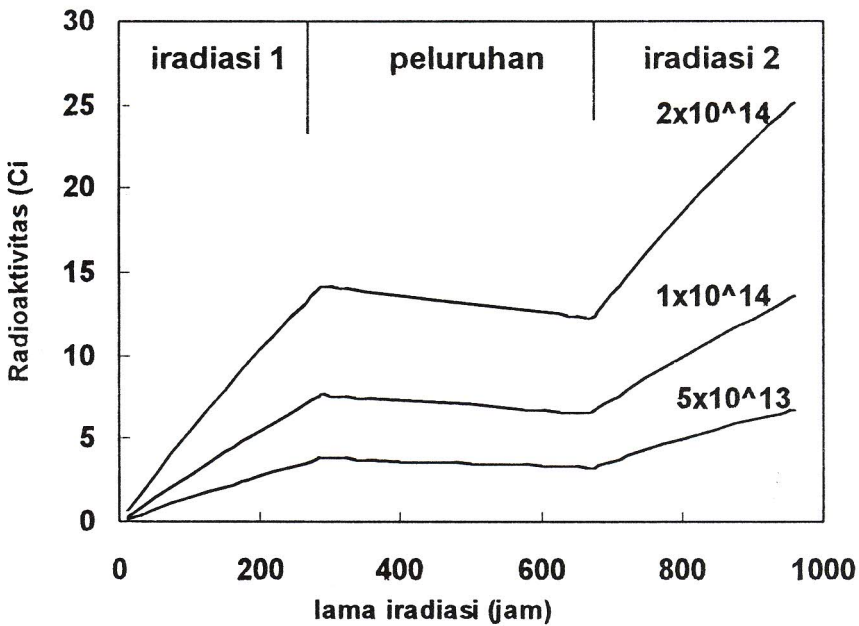
Gambar 4. Hubungan waktu iradiasi dengan radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  yang diperoleh untuk sasaran 25,5 mg. Angka di atas kurva menunjukkan besarnya fluks neutron dalam  $\text{ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ .

Tabel 2. Waktu iradiasi yang diperlukan untuk mendapatkan  $^{192}\text{Ir}$  10 Ci.

Fluks Neutron ( $\text{ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ )	Berat Sasaran	
	23,5 mg	25,5 mg
$5 \times 10^{13}$	1019 jam	910 jam
$1 \times 10^{14}$	463 jam	419 jam
$2 \times 10^{14}$	224 jam	203 jam



Reaktor GA Siwabessy P2TRR BATAN saat ini dioperasikan selama 12 hari untuk satu periode dengan selang waktu 16 hari. Apabila sasaran iridium alam diiradiasi dengan siklus operasi tersebut, maka radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  yang didapatkan untuk sasaran seberat 25,5 mg seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



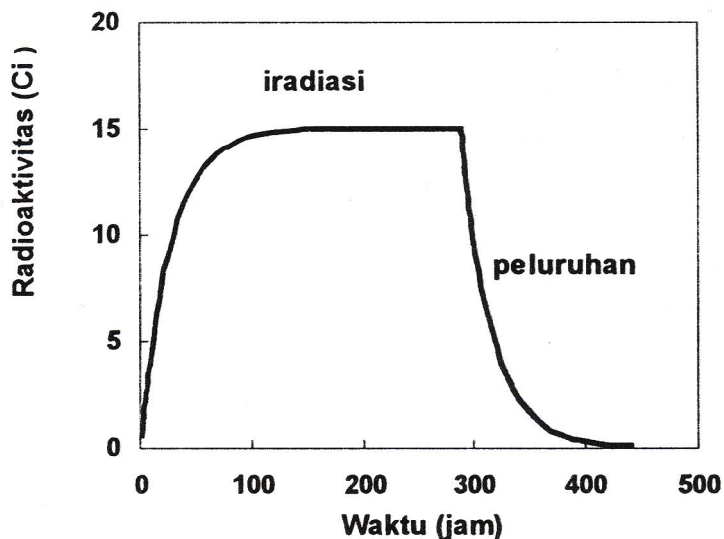
**Gambar 5.** Hubungan waktu dengan radioaktivitas sumber apabila sasaran seberat 25,5 mg diiradiasi selama 12 hari dengan selang waktu antar iradiasi selama 16 hari. Angka di atas kurva menunjukkan besarnya fluks neutron dalam  $\text{ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ .

Radioaktivitas yang didapatkan untuk tiap akhir tahapan iradiasi ditunjukkan pada Tabel 3. Apabila fluks neutron sebesar  $5 \times 10^{13}$ , radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  maksimum yang akan didapatkan adalah sebesar 6,76 Ci untuk 2 kali iradiasi, sedangkan fluks neutron sebesar  $1 \times 10^{14}$  sebesar 13,51 Ci. Angka ini telah melebihi angka 10 Ci yang diperlukan. Sedangkan apabila fluks neutron setinggi  $2 \times 10^{14}$ , dengan satu periode iradiasi selama 12 hari dapat diperoleh radioaktivitas sebesar 14,19 Ci. Radioaktivitas ini sudah cukup sebagai sumber radiasi untuk radioterapi laju dosis tinggi.

**Tabel 3.** Radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  yang diperoleh pada akhir iradiasi 1 dan 2 apabila reaktor dioperasikan selama 12 hari dan *shut down* selama 16 hari.

Fluks neutron ( $\text{ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ )	Radioaktivitas pada akhir iradiasi 1 (Ci)	Radioaktivitas pada akhir iradiasi 2 (Ci)
$5 \times 10^{13}$	3,82	6,76
$1 \times 10^{14}$	7,64	13,51
$2 \times 10^{14}$	14,19	25,10

Faktor lain yang harus diperhatikan di dalam penyediaan sumber radiasi adalah besarnya pengotor radionuklida yang dihasilkan. Secara teoritis, radionuklida pengotor utama adalah  $^{194}\text{Ir}$  yang dihasilkan dari  $^{193}\text{Ir}$  yang ada di dalam iridium alam dengan kelimpahan sebesar 62,7% dan memilikiampang lintang reaksi ( $n,\gamma$ ) sebesar 111 barn [2]. Untuk sasaran seberat 25,5 mg, dengan menggunakan fluks neutron sebesar  $1 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ , radioaktivitas  $^{194}\text{Ir}$  yang dihasilkan seperti ditunjukkan oleh Gambar 6.



**Gambar 6.** Hubungan antara waktu iradiasi dengan radioaktivitas  $^{194}\text{Ir}$  dan peluruhannya dari sasaran 25,5 mg. Hasil perhitungan dengan fluks neutron  $1 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ .

Radioaktivitas radionuklida tersebut segera mendekati titik jenuh, yaitu keadaan dimana laju reaksi pembentukan sama dengan laju reaksi peluruhan. Hal ini disebabkan waktu paronya yang pendek, 19,15 jam. Apabila iradiasi dilakukan selama 12 hari (288 jam), maka akan dihasilkan radioaktivitas sebesar 15,02 Ci. Gambar 6 menunjukkan pula kurva peluruhan  $^{194}\text{Ir}$  setelah iradiasi dihentikan, dimana radioaktivitasnya segera turun dengan cepat dan setelah 150 jam radioaktivitas yang dimiliki tinggal 0,4% dari radioaktivitas semula atau sebesar 0,061 Ci. Radioaktivitas ini telah berada di bawah 1% dibandingkan dengan radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  yang dihasilkan dan angka ini akan terus menurun seiring dengan perjalanan waktu.

## KESIMPULAN

Dari kajian besarnya radioaktivitas pada iradiasi sasaran iridium dengan beberapa kondisi iradiasi diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Waktu iradiasi yang diperlukan untuk mendapatkan  $^{192}\text{Ir}$  dengan radioaktivitas 10 Ci dari sasaran seberat 23,5 mg adalah 1019, 463 dan 224 jam masing-masing untuk fluks neutron  $5 \times 10^{13}$ ,  $1 \times 10^{14}$  dan  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ , sedangkan untuk sasaran 25,5 mg diperlukan waktu iradiasi 910, 419 dan 203 jam untuk fluks neutron yang sama.
2. Jika reaktor beroperasi dengan siklus 12 hari operasi dan 16 hari *shut down*, selama 2 periode dari sasaran 25,5 mg akan diperoleh  $^{192}\text{Ir}$  dengan radioaktivitas masing-masing sebesar 6,76, 13,51 dan 25,10 Ci untuk fluks neutron  $5 \times 10^{13}$ ,  $1 \times 10^{14}$  dan  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ . Apabila fluks neutron setinggi  $2 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ , radioaktivitas sebesar 14,19 Ci dapat dicapai dengan iradiasi selama 12 hari atau satu periode operasi.
3. Iridium-194 dengan waktu paro 19,15 jam sebagai pengotor radionuklida akan dihasilkan pada saat iradiasi, tetapi radioaktivitasnya akan segera mendekati titik jenuh dalam waktu singkat dan bila iradiasi dihentikan, radionuklida ini meluruh dengan cepat sehingga hanya tinggal 1% dari radioaktivitas  $^{192}\text{Ir}$  setelah 150 jam.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. T. Genka, staf Japan Atomic Industry Forum (JAIF), atas diskusi tentang reaksi pada iradiasi sasaran Iridium. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Mr. H. Matsuoka, peneliti Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), atas kesediannya berdiskusi dan memandu penulis melihat proses pembuatan sumber  $^{192}\text{Ir}$  untuk radioterapi laju dosis tinggi di lembaga penelitian tersebut.

---

## DAFTAR PUSTAKA

1. I. IKEDA, "Trends of Radiotherapy in Japan", **Isotope News**, **11**, (1998), 16-19.
2. N. SAITOH, et al, "Handbook of Radioisotope", 3<sup>rd</sup> Ed., Maruzen, Tokyo (1996), 15-74.
3. T. GENKA, (2001), Komunikasi Pribadi.
4. H. MATSUOKA, (2002), Komunikasi Pribadi.
5. S.R. TAMAT, "Production of Radioisotopes and Radiopharmaceuticals in Indonesia", **Proceeding of the 6<sup>th</sup> Nuclear Energy Symposium**, Jakarta (2001), 121 – 134.
6. H.HASTOWO, I. KUNTORO, and J.S. PANE, "The RSG-G Multipurpose Reactor, Its Availability for Serving Scientific and Engineering Research", **Proceeding of the 6<sup>th</sup> Nuclear Energy Symposium**, Jakarta (2001), 105 – 112.
7. A. SATOH, H. KOGURE, and T. IMAHASHI, "Production of <sup>198</sup>Au and <sup>192</sup>Ir Sources for Cancer Therapy", 1<sup>st</sup> Ed., JAERI, Ibaraki (1991).