

PERHITUNGAN PEMBUATAN EMAS-192, IRIDIUM-192 DAN LUTESIUM-177 DENGAN AKTIVASI NEUTRON UNTUK PARTIKEL NANO RADIOAKTIF

Rohadi Awaludin

Pusat Radioisotop dan Radiofarmaka (PRR), BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang

ABSTRAK

PERHITUNGAN PEMBUATAN EMAS-192, IRIDIUM-192 DAN LUTESIUM-177 DENGAN AKTIVASI NEUTRON UNTUK PARTIKEL NANO RADIOAKTIF. Telah dilaporkan bahwa partikel nano terbukti efektif untuk penanganan kanker melalui *thermotherapy*. Sel kanker dimungkinkan pula dimatikan menggunakan radiasi radioisotop dari partikel nano. Studi pembuatan partikel nano radioaktif dengan aktivasi neutron telah dilakukan untuk mendapatkan karakteristik partikel nano radioaktif dengan metode ini. Pada studi ini dikaji partikel nano emas, iridium dan lutesium dengan diameter 100 nm. Di dalam studi ini perhitungan dilakukan untuk iradiasi di posisi *central irradiation position* (CIP) reaktor GA Siwabessy selama 12 hari. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada saat akhir iradiasi diperoleh ^{198}Au dengan radioaktivitas 0,378 Bq di dalam partikel nano emas. Di dalam partikel nano iridium dihasilkan ^{192}Ir dengan radioaktivitas 0,179 Bq. Di dalam partikel nano iridium dihasilkan pula ^{194}Ir dengan radioaktivitas 0,337 Bq dan meluruh dengan cepat. Di dalam partikel nano lutesium dihasilkan ^{177}Lu dengan radioaktivitas 0,0884 Bq. Di dalam partikel ini dihasilkan pula $^{176\text{m}}\text{Lu}$ dan $^{177\text{m}}\text{Lu}$. Radioisotop $^{176\text{m}}\text{Lu}$ dihasilkan 0,037Bq pada saat akhir iradiasi dan meluruh dengan cepat karena waktu paruh hanya 3,6 jam. Radioisotop ^{177}Lu dihasilkan dengan radioaktivitas 0,0095% dari radioaktivitas ^{177}Lu saat akhir iradiasi. Pada saat iradiasi, partikel nano dimasukkan ke dalam ampul kwarsa dan kapsul aluminium. Dari ampul kwarsa dan aluminium dihasilkan radioisotop dengan waktu paruh yang pendek dari iradiasi neutron termal.

Kata kunci: emas-198, iridium-192, lutesium-177, aktivasi neutron

ABSTRACT

CALCULATION OF PRODUCTION OF GOLD-198, IRRIDIUM-192 AND LUTETIUM-177 BY NEUTRON ACTIVATION FOR RADIOACTIVE NANOPARTICLE. It was reported that nanoparticle was effective for cancer treatment by *thermotherapy*. It is also possible to kill cancer cell by radiation of radioisotope from nanoparticle. A study on production of radioactive nanoparticles by neutron activation has been carried out. Nanoparticles of gold, iridium and lutetium with diameter of 100 nm were studied. Calculations were carried out for irradiation at central irradiation position (CIP) of GA siwabessy reactor for 12 days. Calculation results showed that gold-198 with radioactivity of 0.378 Bq was produced in the gold nanoparticle. In the iridium nanoparticle, ^{192}Ir with radioactivity of 0.179 Bq was produced. Radioisotope of ^{194}Ir was also produced with radioactivity 0.337Bq at the end of irradiation in the iridium nanoparticle. The radioisotope decayed fast and became 0.000133Bq after 10 days. In the lutetium nanoparticle, ^{177}Lu with radioactivity of 0.0884Bq was produced. In the lutetium nanoparticle, $^{176\text{m}}\text{Lu}$ and $^{177\text{m}}\text{Lu}$ were also produced. Lutetium-176m decayed fast and ^{177}Lu radioactivity was 0.0095% of the ^{177}Lu radioactivity at the end of irradiation. During neutron irradiation, the nanoparticle was put in the quartz ampule and aluminum capsules. Radioisotopes with short half life were produced in the quartz and aluminum.

Keywords: gold-198, iridium-192, lutetium-177, neutron activation

PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi nano semakin luas dari hari ke hari. Terobosan terobosan baru di berbagai bidang termasuk bidang kesehatan telah dilahirkan. Harapan besar pun digantungkan pada kemajuan rekayasa tingkat molekul ini untuk menyelesaikan masalah masalah kesehatan [1-3]. Sebuah tim peneliti dari Rice University berhasil melakukan uji coba penanganan kanker menggunakan partikel nano berukuran 120 nm. Nanopartikel tersebut berupa partikel emas yang dibungkus oleh peptida atau antibodi pada permukaannya. Setelah dimasukkan ke dalam tubuh, peptida atau antibodi tersebut akan membawa partikel emas menempel pada sel kanker. Partikel emas dipanaskan menggunakan sinar infra merah dari luar tubuh untuk membunuh sel kanker di dekatnya. Metode ini telah berhasil pada tahap uji binatang [4]. Partikel nano dari besi telah dikembangkan pula untuk *nanoparticle thermotherapy* (NPTT). Partikel nano tersebut diikatkan pada antibodi untuk mendekatkannya pada sel kanker. Partikel tersebut selanjutnya dipanaskan dari luar tubuh menggunakan *alternating magnetic field* (AMF) [5].

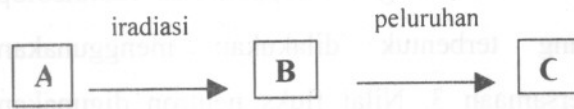
Radiasi pengion dari radioisotop telah terbukti efektif untuk mematikan sel kanker. Ada beberapa radioisotop yang telah dimanfaatkan untuk terapi, diantaranya adalah iridium-192, emas-198 dan lutesium-177.

Ketiga radioisotop ini merupakan radioisotop radioisotop pemancar beta. Radioisotop iridium-192 (^{192}Ir) telah banyak digunakan dalam terapi radiasi, baik untuk laju dosis rendah (*low dose rate, LDR*), maupun laju dosis tinggi (*high dose rate, HDR*) [6]. Radioisotop emas-198 telah digunakan pula pada *brachytherapy* dalam bentuk *gold grain* [6]. Sedangkan lutesium-177 telah dikembangkan untuk *radioimmunotherapy* [7]. Oleh karena itu, partikel nano radioaktif yang mengandung radioisotop radioisotop tersebut memiliki potensi untuk penanganan kanker. Pada makalah ini akan disajikan hasil studi awal pembuatan partikel nano radioaktif menggunakan fasilitas iradiasi neutron di reaktor G.A. Siwabessy BATAN. Tujuan dari studi ini adalah memperoleh radioaktivitas radioisotop yang terbentuk di dalam partikel nano dari iradiasi neutron menggunakan fasilitas iradiasi tersebut.

TEORI

Apabila sebuah isotop terkena paparan neutron termal dapat terjadi penangkapan neutron oleh inti atom dan pelepasan radiasi gamma yang dikenal dengan reaksi (n,γ) . Laju reaksi inti tersebut berbeda-beda bergantung padaampang lintang reaksi nuklirnya. Apabila isotop yang terbentuk berupa radioisotop, maka ia akan meluruh menjadi

isotop lain. Gambaran reaksi tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema reaksi aktivasi neutron dari isotop A menjadi radioisotop B dan peluruhannya menjadi isotop C.

Pada Gambar 1 ditunjukkan bahwa isotop A setelah penangkapan neutron berubah menjadi radioisotop B yang selanjutnya meluruh menjadi isotop C. Isotop A dan radioisotop B merupakan unsur yang sejenis. Laju penambahan jumlah radioisotop B sama dengan laju reaksi pembentukannya dari isotop A dikurangi dengan laju peluruhan menjadi isotop C. Laju reaksi pembentukan merupakan perkalian dari jumlah atom isotop A dengan fluks neutron dan tampang lintang reaksi. Sedangkan laju peluruhan merupakan perkalian antara jumlah atom B yang telah terbentuk dan konstanta peluruhannya. Laju penambahan radioisotop B secara matematis dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$dN_B/dt = N_A\phi\sigma - \lambda N_B \quad (1)$$

Dimana,

$$dN_B/dt : \text{Laju pembentukan isotop B} \\ \text{(atom/s)}$$

N_A : Jumlah atom sasaran (atom)

ϕ : Fluks neutron ($\text{n.s}^{-1}\text{cm}^{-2}$)

σ : Tampang lintang reaksi
($\text{barn} = 10^{-24}\text{cm}^2$)

λ : Konstanta peluruhan
radioisotop B (s^{-1})

Jumlah atom sasaran adalah jumlah atom unsur tersebut dikalikan kelimpahan isotop sasaran. Apabila persamaan 1 diselesaikan dan diberi batas awal bahwa ketika sebelum iradiasi belum ada isotop B ($N_B = 0$ saat $t = 0$) maka diperoleh persamaan berikut.

$$N_B = N_A\phi\sigma(1 - e^{-\lambda t}) / \lambda \quad (2)$$

Pada persamaan 2, t menyatakan waktu iradiasi. Besarnya radioaktivitas B (A_B) dapat dinyatakan dengan $N_B\lambda$, sehingga besarnya radioaktivitas B dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$A_B = N_A\phi\sigma(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

Persamaan 3 ini merupakan persamaan umum untuk mendapatkan radioaktivitas hasil iradiasi dengan neutron [8].

Setelah iradiasi dihentikan, reaksi penangkapan neutron berhenti dan radioisotop B meluruh dengan laju peluruhan sebesar perkalian antara konstanta peluruhan dan jumlah atom B yang tersisa. Oleh karena itu, setelah peluruhan selama waktu t_d ,

radioaktivitas B dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$A_B = A_{B0}e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Pada persamaan tersebut A_{B0} menyatakan radioaktivitas B saat akhir iradiasi (*end of irradiation, EOI*) [8].

TATA KERJA

Pada kajian ini diasumsikan bahwa seluruh neutron yang sampai di posisi *central irradiation position* (CIP) sudah termoderasi menjadi neutron termal karena posisi tersebut relatif jauh dari letak bahan bakar. Oleh karena itu, reaksi inti yang dapat terjadi karena neutron cepat diabaikan pada kajian ini.

Saat ini telah dikembangkan partikel nano dengan diameter pada kisaran 100 nm dan dilaporkan efektif untuk terapi kanker [4]. Oleh karena itu, pada studi ini perhitungan dilakukan terhadap partikel nano dengan diameter 100 nm. Pada perhitungan ini digunakan berat jenis emas, iridium dan lutesium sebesar 19,3, 22,65 dan 9,84 g/cm³ [9]. Partikel nano diasumsikan berbentuk bola untuk menentukan jumlah atom tiap partikel. Beberapa metode pembuatan partikel nano telah berhasil dikembangkan di tanah air. Nurul dkk telah berhasil mengembangkan metode *ball mill* untuk pembuatan partikel

nano [10], sehingga pada kajian ini tidak dilakukan kajian penyiapan partikel nano.

Perhitungan radioaktivitas radioisotop yang terbentuk dilakukan menggunakan persamaan 3. Nilai fluks neutron digunakan fluks neutron di posisi *central irradiation position* (CIP) reaktor G.A. Siwabessy sebesar $1,3 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$. Perhitungan dilakukan untuk iradiasi selama 12 hari sesuai dengan siklus operasi reaktor G.A. Siwabessy [11]. Sedang pada perhitungan peluruhan radioaktivitas digunakan persamaan 4. Penurunan radioaktivitas dihitung sampai dengan 15 hari sehingga telah melewati 5 kali waktu paruh radioisotop terpendek yaitu ¹⁹⁸Au sehingga radioaktivitas telah turun jauh dari radioaktivitas pada saat akhir iradiasi.

Pada iradiasi neutron di posisi CIP reaktor G.A. Siwabessy, sasaran dimasukkan ke dalam ampul kwarsa dan ampul tersebut dimasukkan ke dalam *inner capsule* yang terbuat dari aluminium. *Inner capsule* selanjutnya dimasukkan ke dalam *outer capsule* dan dimasukkan ke posisi iradiasi. Setelah iradiasi dihentikan, wadah sasaran berupa kwarsa dan aluminium menjadi radioaktif pula karena aktivasi neutron. Kwarsa tersusun dari unsur silikon dan Oksigen. Di dalam kegiatan ini dikaji pula radioisotop yang terbentuk dari wadah iradiasi serta waktu yang diperlukan untuk meluruhkan radioisotop radioisotopnya.

Analisis kemurnian radionuklida perlu dilakukan terhadap dari hasil iradiasi. Analisis ini dapat dilakukan menggunakan spektrometer gamma dan melalui pengukuran waktu paruh. Pada kegiatan dikaji pula pola hasil pengukuran spektrometer gamma yang dapat diperoleh dari partikel nano emas, iridium dan lutesium.

HASIL DAN PEMBAHASAN

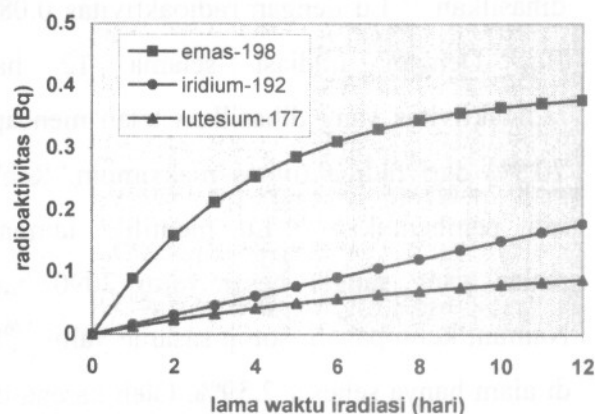
Komposisi isotop alam dari emas, iridium dan lutesium ditunjukkan pada Tabel 1. Emas alam tersusun dari satu isotop saja yaitu ^{197}Au . Dari aktivasi neutron dihasilkan radioisotop ^{198}Au dengan waktu paruh 2,69 hari. Reaksi inti ini memilikiampang lintang reaksi sebesar 98,6 barn. Iridium alam tersusun dari 2 buah isotop yaitu ^{191}Ir dan ^{193}Ir dengan kelimpahan masing masing sebesar 37,3% dan 62,7%. Isotop ^{191}Ir menghasilkan ^{192}Ir dengan waktu paruh 73,8 hari dari aktivasi neutron. Tampang lintang reaksi ini sebesar 930 barn. Sedangkan isotop ^{193}Ir menghasilkan ^{194}Ir dengan waktu paruh 19,1 jam. Tampang lintang reaksi inti ini sebesar 111 barn. Lutesium alam tersusun dari 2 isotop yaitu ^{175}Lu dan ^{176}Lu dengan kelimpahan 97,4 dan 2,6 %. Isotop ^{175}Lu menghasilkan radioisotop $^{176\text{m}}\text{Lu}$ dengan waktu paruh 3,6 jam, sedangkan ^{176}Lu menghasilkan radioisotop ^{177}Lu dan $^{177\text{m}}\text{Lu}$ dengan waktuk paruh 6,73 hari dan 160 hari. Tampang lintang reaksi inti

ini masing masing sebesar 2090 dan 2,8 barn [8].

Tabel 1. Komposisi isotop emas, iridium dan lutesium alam dan radioisotop yang terbentuk dari aktivasi neutron termal.

unsur	isotop	Kelimpahan (%)	radioisotop yang terbentuk	waktu paruh	tampang lintang reaksi (barn)
Au	^{197}Au	100	^{198}Au	2,69 hari	98,6
Ir	^{191}Ir	37,3	^{192}Ir	73,8 hari	930
	^{193}Ir	62,7	^{194}Ir	19,1 jam	111
Lu	^{175}Lu	97,4	$^{176\text{m}}\text{Lu}$	3,6 jam	16,4
	^{176}Lu	2,6	^{177}Lu	6,73 hari	2090
			$^{177\text{m}}\text{Lu}$	160 hari	2,8

Radioaktivitas ^{198}Au , ^{192}Ir dan ^{177}Lu dari iradiasi partikel nano emas, iridium dan lutesium dengan diameter 100 nm ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Radioaktivitas ^{198}Au , ^{192}Ir dan ^{177}Lu seiring dengan lama waktu iradiasi.

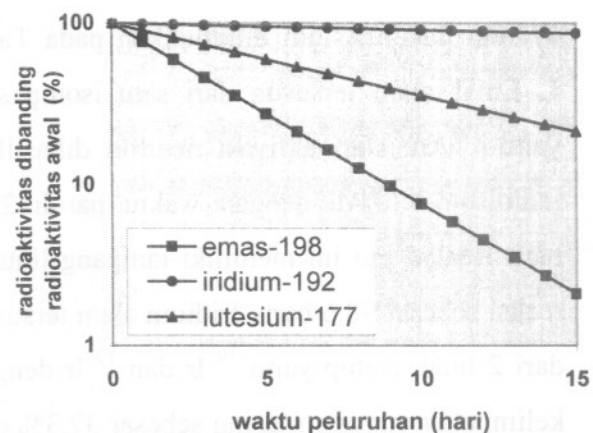
Dari iradiasi selama 12 hari terhadap partikel nano emas dihasilkan ^{198}Au sebesar 0,378 Bq. Dengan iradiasi selama 12 hari atau 4,5 kali waktu paruhnya, radioaktivitas ^{198}Au telah mencapai 95,4% dari radioaktivitas maksimum dengan fluks neutron di posisi CIP. Oleh karena itu, radioaktivitas ^{198}Au tidak menunjukkan kenaikan yang besar dengan perpanjangan waktu iradiasi.

Di dalam partikel nano iridium dihasilkan ^{192}Ir dengan radioaktivitas 0,179 Bq. Dengan waktu paruh selama 73,6 hari, radioaktivitas ^{192}Ir baru sebesar 10,6% dari radioaktivitas maksimum dari iradiasi di CIP. Radioaktivitas ^{192}Ir masih terus menunjukkan kenaikan yang sangat besar seiring dengan perpanjangan waktu iradiasi. Dengan fluks neutron sebesar $1,3 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$, radioaktivitas jenuh ^{192}Ir yang dapat dihasilkan sebesar 1,68 Bq.

Di dalam partikel nano lutesium dihasilkan ^{177}Lu dengan radioaktivitas 0,0884 Bq. Dengan iradiasi selama 12 hari, radioaktivitas yang dihasilkan telah mencapai 70,9% dari radioaktivitas maksimum. Reaksi inti pembentukan ^{177}Lu memilikiampang reaksi yang sangat besar yaitu 2090 barn. Namun, kelimpahan isotop sasaran yaitu ^{176}Lu di alam hanya sebesar 2,59%. Oleh karena itu, radioaktivitas ^{177}Lu dapat ditingkatkan dengan menggunakan lutesium diperkaya dengan

kelimpahan ^{176}Lu yang lebih tinggi dari kelimpahannya di alam.

Setelah iradiasi dihentikan, radioisotop ^{198}Au , ^{192}Ir dan ^{177}Lu meluruh dengan laju peluruhan sesuai dengan waktu paruh masing-masing. Penurunan radioaktivitas seiring dengan waktu ditunjukkan pada Gambar 2.

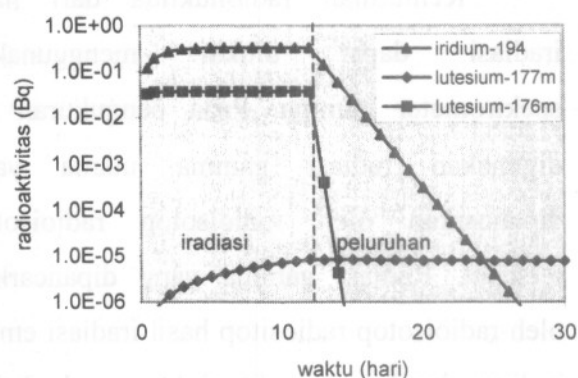


Gambar 2. Radioaktivitas ^{198}Au , ^{192}Ir dan ^{177}Lu seiring dengan waktu peluruhan dibandingkan dengan radioaktivitas saat akhir iradiasi.

Radioisotop ^{198}Au meluruh paling cepat dibandingkan radioisotop lain. Setelah 15 hari, radioaktivitas tinggal 2,7% dibandingkan radioaktivitas pada saat akhir iradiasi. Radioisotop ^{177}Lu juga meluruh relatif cepat dengan waktu paruh 6,73 hari. Setelah 15 hari, radioaktivitas tinggal 21,3% dibandingkan dengan radioaktivitas saat akhir

iradiasi atau sebesar 0,0189Bq. Sedang ^{192}Ir memiliki waktu paruh yang relatif panjang yaitu 73,8 hari. Oleh karena itu, dalam waktu 15 hari hanya terlihat sedikit penurunan. Pada hari ke 15, radioaktivitas ^{192}Ir sebesar 86,8% dibandingkan pada saat akhir iradiasi atau sebesar 0,155 Bq. Jadi, dari ketiga jenis partikel nano ini, ^{198}Au di dalam partikel nano emas memiliki radioaktivitas paling tinggi pada saat akhir iradiasi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Namun radioisotop ini meluruh dengan cepat karena waktu paruhnya yang relatif pendek. Sedangkan radioaktivitas ^{192}Ir tidak setinggi ^{198}Au pada saat akhir iradiasi, namun radioaktivitas radioisotop ini dapat bertahan dalam waktu yang lebih lama karena waktu paruhnya 73,8 hari.

Di dalam partikel nano emas tidak dihasilkan radioisotop lain selain ^{198}Au . Jadi di dalam partikel nano emas tidak dihasilkan radioisotop pengotor. Di dalam partikel nano iridium dihasilkan pula radioisotop ^{194}Ir dengan waktu paruh 19,1 jam. Sedang di dalam partikel nano lutesium dihasilkan $^{176\text{m}}\text{Lu}$ dan $^{177\text{m}}\text{Lu}$ dengan waktu paruh 3,6 jam dan 160 hari. Radioaktivitas ^{194}Ir di dalam partikel iridium dan $^{176\text{m}}\text{Lu}$ serta $^{177\text{m}}\text{Lu}$ di dalam partikel lutesium serta peluruhannya setelah iradiasi ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Radioaktivitas ^{194}Ir , $^{176\text{m}}\text{Lu}$ dan $^{177\text{m}}\text{Lu}$ pada saat iradiasi dan setelah iradiasi dihentikan.

Pada saat akhir iradiasi, di dalam partikel nano iridium dihasilkan ^{194}Ir dengan radioaktivitas sebesar 0,337 Bq. Namun, karena waktu paruh hanya 19,1 jam, radioisotop ini meluruh dengan cepat setelah iradiasi dihentikan. Radioaktivitas ^{194}Ir menjadi 0,010 Bq setelah 5 hari dan tinggal 0,000133 Bq setelah 10 hari sejak iradiasi dihentikan.

Di dalam partikel nano lutesium, radioisotop $^{176\text{m}}\text{Lu}$ dihasilkan sebesar 0,037 Bq pada saat akhir iradiasi. Radioisotop tersebut meluruh dengan cepat karena waktu paruhnya hanya 3,6 jam. Sedangkan radioisotop $^{177\text{m}}\text{Lu}$ dihasilkan sebesar $8,46 \times 10^{-6}$ Bq atau sebesar 0,0095% dibandingkan dengan radioaktivitas ^{177}Lu pada saat akhir iradiasi. Radioaktivitas $^{177\text{m}}\text{Lu}$ ini sangat kecil karenaampang lintang reaksi intinya relatif kecil sebesar 2,8 barn.

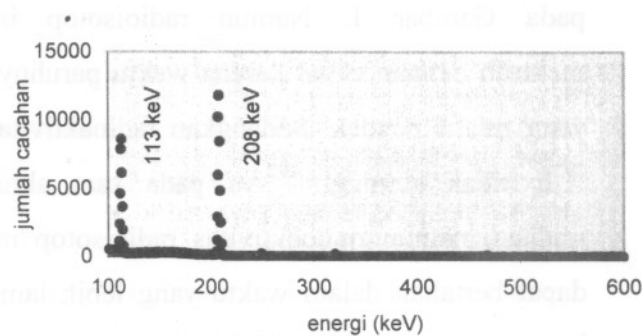
Kemurnian radionuklida dari hasil iradiasi dapat diukur menggunakan spektrometer gamma. Pada pengukuran ini digunakan radiasi gamma utama yang dipancarkan oleh radioisotop radioisotop tersebut. Radiasi gamma yang dipancarkan oleh radioisotop radioisotop hasil iradiasi emas, iridium dan lutesium ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Waktu paruh dan radiasi gamma utama yang dipancarkan oleh radioisotop dari emas, iridium dan lutesium dari aktivasi neutron termal

unsur	Radio-isotop	waktu paruh	energi gamma (keV)	intensitas (%)
emas	¹⁹⁸ Au	2,69 hari	412	95,5
			676	0,80
iridium	¹⁹² Ir	73,8 hari	296	28,7
			308	30,0
			317	82,8
			468	47,8
	¹⁹⁴ Ir	19,1 jam	294	2,6
			328	13,1
			645	1,2
lutesium	¹⁷⁷ Lu	6,7 hari	113	6,4
			208	11,0
	^{177m} Lu	160 hari	113	21,7
			208	59,4
			249	6,1
			319	10,4
			413	17,4
^{176m} Lu	3,6 jam	88,3	10,0	

Contoh spektrometer gamma hasil iradiasi dari lutesium ditunjukkan pada gambar 4. Spektrogram tersebut merupakan hasil pengukuran dari hasil iradiasi lutesium dalam bentuk serbuk. Hasil pengukuran tersebut

menunjukkan adanya ¹⁷⁷Lu, dan tidak menunjukkan adanya ^{177m}Lu secara signifikan di dalam sampel. Radiasi gamma dengan energi 208 keV dan 113 dihasilkan baik dari ¹⁷⁷Lu dan ^{177m}Lu. Namun, ^{177m}Lu memancarkan pula radiasi gamma dengan energi 249, 319 dan 413 keV. Di dalam hasil pengukuran tidak terlihat dengan jelas puncak pada 249, 319 dan 413 keV.



Gambar 4. Contoh hasil pengukuran hasil iradiasi lutesium menggunakan spektrometer gamma

Pada iradiasi neutron, partikel nano dimasukkan ke dalam ampul kwarsa dan selanjutnya dimasukkan ke dalam kapsul aluminium. Kwarsa tersusun dari silikon oksida sehingga unsur utama di dalamnya adalah silikon dan oksigen. Kandungan isotop alam dari unsur aluminium, silikon dan oksigen ditunjukkan pada Tabel 3. Dari tabel tersebut diketahui bahwa ketiga unsur tersebut menghasilkan radioisotop dengan waktu paruh yang pendek. Oleh karena itu, setelah iradiasi dihentikan, waktu untuk meluruhkan

radioisotop yang terbentuk di dalam wadah sampel tidak lama. Radioisotop ^{29}Al , ^{19}O dan ^{31}Si memiliki waktu paruh masing masing 2,24 menit, 26,9 detik dan 157 menit. Untuk aluminium dan oksigen, dalam waktu 1 jam, radioaktivitas radioisotop yang terbentuk telah dapat diabaikan. Sedangkan dari unsur silikon, radioaktivitas menjadi sangat kecil setelah diluruhkan selama 26 jam yaitu 10 kali waktu paruhnya. Oleh sebab itu, pengolahan sampel dapat dilakukan setelah diluruhkan selama 26 jam. Waktu peluruhan ini tidak banyak mengurangi radioaktivitas radioisotop yang diharapkan di dalam partikel nano emas, iridium maupun lutesium karena waktu paruh radioisotop tersebut relatif panjang.

Tabel 3. Isotop alam dari aluminium, silikon dan oksigen yang merupakan unsur penyusun bahan wadah iradiasi

unsur	isotop	Kelimpahan (%)	radioisotop yang terbentuk	waktu paruh	tampang lintang reaksi (barn)
Al	^{27}Al	100	^{28}Al	2,24 menit	0,231
Si	^{28}Si	92,2	-	-	-
	^{29}Si	4,7	-	-	-
	^{30}Si	3,1	^{31}Si	157 menit	0,108
O	^{16}O	99,76	-	-	-
	^{17}O	0,04	-	-	-
	^{18}O	0,20	^{19}O	26,9 detik	0,16

KESIMPULAN

Dari kajian pembuatan partikel nano melalui iradiasi neutron termal di posisi CIP

reaktor G.A. Siwabessy dengan fluks neutron $1,3 \times 10^{14} \text{ ns}^{-1}\text{cm}^{-2}$ selama 12 hari diperoleh hasil sebagai berikut.

- Di dalam partikel nano emas dihasilkan ^{198}Au dengan radioaktivitas 0,378 Bq pada saat akhir iradiasi. Tidak ada radioisotop lain yang dihasilkan di dalam partikel emas.
- Di dalam partikel nano iridium dihasilkan ^{192}Ir dengan radioaktivitas 0,179 Bq pada saat akhir iradiasi. Di dalam partikel nano iridium dihasilkan pula ^{194}Ir dengan radioaktivitas 0,337 Bq. Radioaktivitas ^{194}Ir meluruh dengan cepat karena waktu paruh yang pendek yaitu 19,1 jam. Setelah 10 hari sejak iradiasi dihentikan, radioaktivitas tinggal 0,000133Bq.
- Di dalam partikel nano lutesium dihasilkan ^{177}Lu dengan radioaktivitas 0,0884 Bq pada saat akhir iradiasi. Di dalam partikel lutesium dihasilkan pula $^{176\text{m}}\text{Lu}$ dan $^{177\text{m}}\text{Lu}$. Radioisotop $^{176\text{m}}\text{Lu}$ dihasilkan sebesar 0,037 Bq dan meluruh dengan cepat setelah iradiasi dihentikan karena waktu paruh hanya 3,6 jam. Radioisotop $^{177\text{m}}\text{Lu}$ dihasilkan dengan radioaktivitas sebesar 0,0095% dari radioaktivitas ^{177}Lu saat akhir iradiasi.
- Pada saat iradiasi, partikel nano dimasukkan ke dalam ampul kwarsa dan kapsul aluminium. Dari kwarsa dan aluminium dihasilkan radioisotop dengan

waktu paruh yang pendek akibat dari paparan neutron termal sehingga hasil iradiasi dapat diolah tidak lama setelah iradiasi dihentikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. EDITORIAL, Nanomedicine: A matter of rhetoric?, *Nat Materials* **5** (4), 243, (2006).
2. V. WAGNER, A. DULLAART, A.K. BOCK, A. ZWECK, The emerging nanomedicine landscape. *Nat Biotechnol*, **24** (10): 1211-1217, (2006).
3. R. MINCHIN, Sizing up targets with nanoparticles, *Nature nanotechnology*, **3**, 12-13, (2007).
4. C. LOO, A. LIN, L. HIRSCH, M.H. LEE, J. BARTON, N. HALAS, J. WEST, R. DREZEK, Nanoshell-enabled photonics-based imaging and therapy of cancer, *Technol Cancer Treat*. **3** (1), 33-40, (2004)
5. J. LEHMANN, A. NATARAJAN, L. DENARDO G, R. IVKOV, A. FOREMAN, C. CATAPANO, G. MIRICK, T. QUANG, C. GRUETTNER, S.J. DENARDO, Nanoparticle Thermotherapy and External Beam Radiation Therapy for Human Prostate Cancer Cells, *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*, **23** (2), 265-271. (2008).
6. K. MORITA, "Manual for therapy using sealed sources", Aichi cancer center, Nagoya, (1989).
7. A.V. RAO, G. AKABANI, D.A. RIZZIERI, Radioimmunotherapy for Non-Hodgkin's Lymphoma, *Clin Med Res*, **3** (3):157-65, (2005).
8. N. SAITOH, *et al*, "Handbook of Radioisotope", Maruzen, Tokyo, (1996).
9. K. TOYAMA, *et al*, "Dictionary of Chemistry", Iwanami, Tokyo, (1975).
10. NURUL T. R., WAHYU B. W., W. FIRMANSYAH, AGUS S. W., Pengembangan Nanoteknologi Berbasis Ball Mill dan Aplikasinya, *Prosiding Seminar Pemaparan Hasil Litbang Ilmu Pengetahuan Teknik IV*, Bandung, (2008).
11. S. SOENARJO, S.R. TAMAT, I. SUPARMAN, B. PURWADI, RSG-GAS based radioisotopes and sharing program for regional back up supply, *Jurnal Radioisotop dan Radiofarmaka*, **6** (1), 33-43, 2003.