

RADIOAKTIVITAS IODIUM-125 PADA UJI PRODUKSI MENGUNAKAN TARGET XENON-124 DIPERKAYA

Rohadi Awaludin, Hotman Lubis, Anung Pujianto, Ibon Suparman,
Daya Agung Sarwono, Abidin, Sriyono

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

ABSTRAK

RADIOAKTIVITAS IODIUM-125 PADA UJI PRODUKSI MENGGUNAKAN TARGET XENON-124 DIPERKAYA. Telah dilakukan uji produksi ^{125}I menggunakan target xenon diperkaya dengan pengayaan ^{124}Xe sebesar 82,4%. Target diiradiasi neutron di kamar iradiasi di posisi S1 pada reaktor G.A. Siwabessy. Setelah iradiasi selama 24 jam, gas xenon teriradiasi diluruhkan di dalam botol peluruhan selama 7 hari. Radioisotop ^{125}I yang terbentuk di dalam botol peluruhan dilarutkan menggunakan NaOH 0,005N sebanyak 3 kali. Dari uji produksi ke-1 sampai dengan ke-8 diperoleh radioaktivitas total ^{125}I sebesar 9541, 9801, 11239, 9458, 3293, 3735, 4693 dan 2744 mCi. Penurunan radioaktivitas total ^{125}I disebabkan oleh penurunan jumlah gas target. Radioaktivitas ^{125}I hasil pelarutan pertama bergantung pada volume larutan NaOH yang digunakan. Persentase rerata radioaktivitas ^{125}I pada pelarutan pertama sebesar 65,1%, 71,5% dan 82,6% dari radioaktivitas total untuk pelarutan menggunakan larutan NaOH dengan volume 3, 4 dan 5 mL. Konsentrasi radioaktivitas maksimum yang berhasil diproduksi sebesar 3410 mCi/mL dari hasil pelarutan pertama dari uji produksi pertama.

Kata kunci: iodium-125, produksi radioisotop, xenon diperkaya

ABSTRACT

IODINE-125 RADIOACTIVITY DURING PRODUCTION TEST USING ENRICHED XENON-124 TARGET. Production tests of Iodine-125 have been carried out using enriched xenon target with 82,4% of ^{124}Xe enrichment. The target was irradiated at irradiation chamber in S1 position of G.A. Siwabessy reactor. After irradiation for 24 hours, the irradiated xenon gas was decayed at decay pot for 7 days. The produced iodine-125 was dissolved 3 times using NaOH 0.005N. From 1st to 8th tests, the total radioactivities were 9541, 9801, 11239, 9458, 3293, 3735, 4693 and 2744 mCi. The decrease of the total radioactivity was caused by the decrease of the gas target. Radioactivity of the 1st solution depended on the volume of NaOH solution. The average percentages of the 1st solution were 65.1, 71.5 and 82.6% of the total radioactivity for 3, 4 and 5 mL of NaOH. The maximum radioactivity concentration was 3410 mCi/mL from 1st solution of the 1st production test.

Keywords : iodine-125, radioisotope production, enriched xenon.

1. PENDAHULUAN

Penggunaan radioisotop di bidang kesehatan terus menunjukkan peningkatan. Di Jepang dan Amerika Serikat, skala ekonomi penggunaan radioisotop telah mencapai sekitar 5% dari total belanja di bidang kesehatan kedua negara tersebut (1). Salah satu radioisotop yang telah berkembang penggunaannya adalah

iodium-125. Radioisotop ini merupakan radioisotop pemancar gamma berenergi rendah yaitu 35,5 keV dan memiliki umur paro 59,4 hari. Iodium-125 telah dimanfaatkan untuk tujuan diagnosis menggunakan *radioimmunoassay*, pembuatan sumber tertutup untuk penanganan kanker dan *radioactive tracer* untuk penelitian (2,3,4).

Radioisotop ini dapat dihasilkan melalui reaksi aktivasi neutron dengan menembakkan neutron pada target isotop ^{124}Xe . Penembakan ini menghasilkan radioisotop ^{125}Xe yang selanjutnya akan meluruh menjadi ^{125}I . Xenon alam mengandung isotop ^{124}Xe sebesar 0,1%. C.G. Kadhar melaporkan bahwa ^{125}I dapat dibuat menggunakan xenon alam yang dimasukkan ke kapsul *stainless steel*. Kapsul tersebut diiradiasi di dalam reaktor selama 4 hari dan selanjutnya iodium yang terbentuk di dalamnya dilarutkan. Dengan metode ini diperoleh ^{125}I dengan radioaktivitas sebesar 0,7 Ci. Kandungan radioisotop pengotor berupa ^{126}I sangat tinggi, lebih dari 5% (5). Dari hasil ini, untuk mendapatkan ^{125}Xe dengan radioaktivitas yang tinggi diperlukan gas xenon dengan kandungan ^{124}Xe yang telah diperkaya. Selain itu, untuk mendapatkan kemurnian radionuklida yang tinggi diperlukan sistem pemindahan gas xenon. Gas xenon hasil iradiasi dipindahkan ke tempat peluruhan untuk mendapatkan ^{125}I . Dengan metode ini, ^{125}I dapat diperoleh dengan kemurnian radionuklida yang tinggi karena produk ^{125}I tidak bercampur dengan ^{126}I yang terbentuk saat iradiasi (5,6).

Dengan metode pemindahan gas xenon, radioaktivitas ^{125}I yang diperoleh dari

hasil peluruhan xenon-125 setelah dipindahkan ke botol peluruhan dapat dinyatakan dengan persamaan (1) (6). Pada persamaan (1) tersebut A, λ dan t masing-masing menyatakan radioaktivitas, konstanta peluruhan dan waktu peluruhan. Nilai radioaktivitas ^{125}I (A_{I-125}) mencapai maksimum pada saat turunan dari persamaan A_{I-125} terhadap waktu sama dengan nol ($dA/dt = 0$) (2).

Persamaan (3) menunjukkan waktu peluruhan saat radioaktivitas ^{125}I mencapai nilai maksimum.

Pusat radioisotop dan radiofarmaka - BATAN telah berhasil melakukan uji produksi iodium-125 menggunakan target xenon dengan kandungan ^{124}Xe diperkaya dengan metode pemindahan gas xenon. Hasil uji ini perlu dievaluasi dari berbagai sisi, di antaranya radioaktivitas larutan ^{125}I yang berhasil diperoleh. Tujuan dari evaluasi ini adalah mendapatkan gambaran radioaktivitas total dan konsentrasi radioaktivitas yang berhasil diperoleh pada uji produksi ^{125}I menggunakan target xenon diperkaya. Dari evaluasi ini diharapkan didapatkan faktor-faktor yang berpengaruh serta langkah-langkah yang diperlukan untuk meningkatkan radioaktivitas total dan konsentrasi radioaktivitas.

$$A_{I-125} = \left(\frac{\lambda_{I-125}}{\lambda_{Xe-125} - \lambda_{I-125}} \right) A_{Xe-125} \{ \exp(-\lambda_{Xe-125}t) - \exp(-\lambda_{I-125}t) \} \quad (1)$$

$$\frac{dA_{I-125}}{dt} = 0 = \left(\frac{\lambda_{I-125}}{\lambda_{Xe-125} - \lambda_{I-125}} \right) A_{Xe-125} \{ -\lambda_{Xe-125} \exp(-\lambda_{Xe-125}t) + \lambda_{I-125} \exp(-\lambda_{I-125}t) \} \quad (2)$$

$$t = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_{I-125}}{\lambda_{Xe-125}}\right)}{\lambda_{I-125} - \lambda_{Xe-125}} \quad (3)$$

2. BAHAN DAN TATA KERJA

Pada uji produksi ini digunakan target gas xenon dengan kandungan ^{124}Xe sebesar 82,4% dari Isotec Inc., Amerika Serikat. Target yang digunakan sebanyak 0,0223 mol gas xenon. Komposisi isotop di dalam target ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan isotop di dalam target gas xenon diperkaya.

Jenis isotop	Kandungan atom (% jumlah)
^{124}Xe	82,4
^{126}Xe	0,6
^{128}Xe	0,3
^{129}Xe	4,5
^{130}Xe	0,7
^{131}Xe	3,6
^{132}Xe	4,6
^{134}Xe	1,8
^{136}Xe	1,5

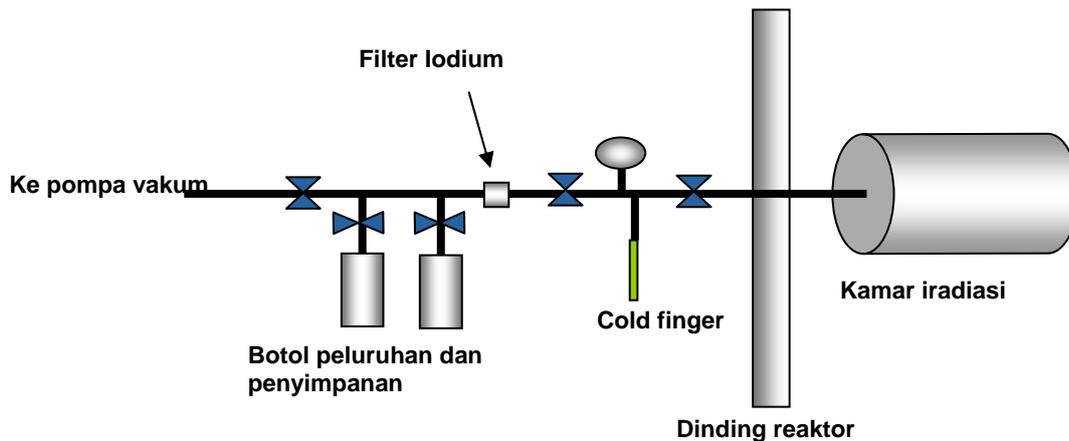
Skema fasilitas produksi iodium-125 ditunjukkan pada Gambar 1. Sebelum digunakan, fasilitas divakumkan sampai dengan tekanan 50 militorr. Gas xenon dipindahkan ke dalam kamar iradiasi memanfaatkan perbedaan tekanan botol penyimpanan dan kamar iradiasi. Perpindahan gas berhenti setelah tekanan botol penyimpanan sama dengan tekanan kamar iradiasi. Gas xenon yang tersisa di botol penyimpanan dipindahkan ke dalam *cold finger* dengan mendinginkan *cold finger* menggunakan nitrogen cair. Selanjutnya dari *cold finger* gas xenon dipindahkan ke kamar iradiasi dengan mengeluarkan nitrogen cair dari dewar *cold finger* setelah katup menuju botol penyimpanan ditutup dan jalur gas ke kamar iradiasi dibuka.

Sasaran gas xenon diiradiasi selama 24 jam di kamar iradiasi di posisi S1 yang berada di pinggir teras reaktor G.A. Siwabessy. Posisi ini memiliki fluks neutron rerata $3 \times 10^{13} \text{ ns}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ (7), selanjutnya gas xenon yang telah diiradiasi dipindahkan ke dalam botol peluruhan. Pada saat pemindahan, gas xenon dilewatkan filter iodium untuk mencegah kontaminasi isotop iodium lain yang terbentuk di kamar iradiasi. Oleh karena itu, iodium-125 yang terbentuk di dalam botol peluruhan merupakan iodium dari gas xenon yang dipindahkan, tidak tercampur dengan iodium yang terbentuk selama iradiasi (8).

Peluruhan ^{125}Xe dilakukan selama 7 hari atau lebih dari 9 kali umur paruhnya yang sebesar 17 jam. Dengan peluruhan 7 hari, radioisotop ^{125}Xe hampir seluruhnya telah berubah menjadi ^{125}I . Waktu 7 hari ini juga mempertimbangkan faktor keselamatan radiasi pada saat pelarutan [9]. Radioisotop ^{125}Xe memancarkan radiasi hasil anihilasi sebesar 511 keV yang dapat memberikan paparan radiasi yang besar ke lingkungan pada saat perisai timbal pada botol peluruhan dibuka (6).

Iodium-125 yang terbentuk di dalam botol peluruhan dilarutkan menggunakan larutan NaOH 0,005N dengan volume bervariasi antara 3-5 mL. Botol peluruhan dikocok selama 30 menit untuk memastikan bahwa seluruh permukaan botol telah terbasahi oleh larutan NaOH.

Larutan selanjutnya dikeluarkan dari botol dan diperoleh larutan ^{125}I .



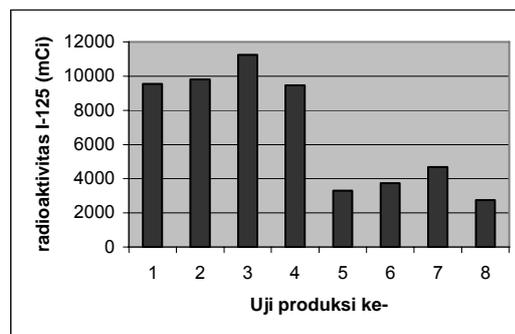
Gambar 1. Skema fasilitas produksi iodium-125

Pelarutan menggunakan larutan NaOH 0,005N ini dilakukan sebanyak 3 kali. Larutan diukur volumenya dan dicuplik sebanyak 5 μ l menggunakan pipet mikro untuk pengukuran radioaktivitas tiap hasil pelarutan. Radioaktivitas diukur menggunakan *gamma ionization chamber* Atom Lab100. Dari pengukuran ini diperoleh radioaktivitas ^{125}I tiap 5 μ l larutan. Dari hasil pengukuran ini dihitung konsentrasi radioaktivitas larutan ^{125}I dan selanjutnya dihitung radioaktivitas ^{125}I total yang didapatkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pelarutan ^{125}I dari botol peluruhan diperoleh larutan fraksi 1, fraksi 2 dan fraksi 3. Radioaktivitas ^{125}I yang diperoleh tersebut dijumlah dan diperoleh radioaktivitas total hasil uji produksi. Hampir seluruh ^{125}I berhasil dilarutkan dengan tiga kali pelarutan. Radioisotop ^{125}I dalam jumlah sangat sedikit yang masih tersisa di dalam botol peluruhan diabaikan pada perhitungan ini. Total radioaktivitas ^{125}I yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 2. Radioaktivitas total tersebut adalah radioaktivitas pada

saat pelarutan atau 7 hari setelah iradiasi.



Gambar 2. Radioaktivitas total ^{125}I dari uji produksi ke-1 sampai dengan ke-8.

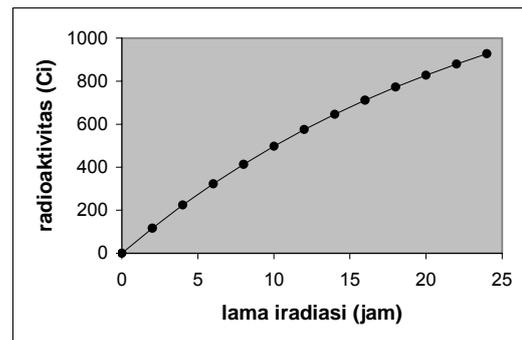
Pada Gambar 2 ditunjukkan bahwa pada 4 kali uji produksi pertama diperoleh radioaktivitas yang tinggi sebesar 9541, 9801, 11239, 9458 mCi. Selanjutnya mulai pada uji produksi ke-5 terjadi penurunan tajam radioaktivitas total. Uji produksi ke-5 sampai dengan ke-8 menghasilkan ^{125}I sebesar 3293, 3735, 4693, 2744 mCi.

Dari Gambar 2 diketahui bahwa radioaktivitas ^{125}I menurun dengan tajam dari uji produksi ke-4 dan ke-5. Hal ini diduga karena penurunan jumlah gas sasaran. Dugaan ini diperkuat dari hasil pengukuran tekanan gas sasaran sebelum gas tersebut dikirim ke kamar iradiasi.

Sebelum dimasukkan ke kamar iradiasi, pada saat uji produksi ke-2 sampai dengan ke-4, tekanan gas di depan kamar iradiasi menunjukkan nilai sekitar 40 psi. Tekanan gas pada uji pertama tidak dapat dibandingkan karena gas sasaran dikirim ke kamar iradiasi dari botol target di luar fasilitas produksi dengan volume botol lebih besar. Pada uji produksi ke-5, tekanan gas menunjukkan angka sekitar 20 psi. Besaran tekanan ini memang sulit dilihat secara teliti karena alat ukur tekanan gas yang ada memiliki rentang ukur yang besar sampai dengan 300 psi. Namun demikian, penurunan tekanan gas terlihat sangat signifikan pada uji produksi keempat dan kelima.

Jumlah sasaran gas xenon yang sesungguhnya teriradiasi di dalam kamar iradiasi tiap uji produksi tidak dapat diketahui dengan tepat. Faktor ini dapat menyebabkan perbedaan hasil untuk tiap kali uji produksi. Gas xenon disimpan di dalam botol penyimpanan yang ada di dalam fasilitas produksi. Botol tersebut memiliki volume dalam sebesar 50 mL. Pada saat penyimpanan, tekanan gas sebanyak 0,0223 mol di dalam botol tersebut lebih dari 10 atm. Jika diasumsikan sebagai gas ideal, gas sebanyak 0,0223 mol pada suhu 20 °C dengan volume 50 mL memiliki tekanan 10,7 atm. Penyimpanan gas bertekanan tinggi dalam waktu lama memiliki kerawanan terjadinya kebocoran. Kebocoran dalam jumlah besar dapat terdeteksi dengan adanya peningkatan paparan radiasi di dalam *glove box*. Namun, jika kebocoran tersebut sangat kecil, sulit untuk diketahui. Berkurangnya tekanan gas

pada saat pengiriman gas ke kamar iradiasi dibandingkan uji produksi sebelumnya mengindikasikan terjadinya penurunan jumlah gas yang tersimpan dalam waktu lama tersebut. Jeda waktu dari uji produksi ke - 4 dan ke - 5 sekitar 10 bulan.

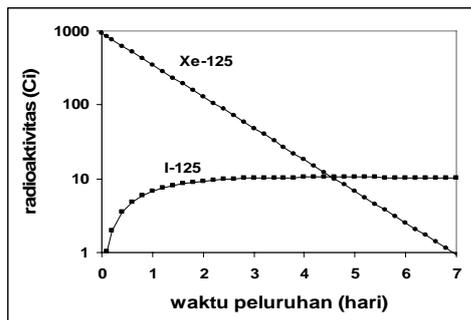


Gambar 3. Radioaktivitas ^{125}Xe seiring dengan waktu iradiasi

Hasil perhitungan secara teoritis radioaktivitas ^{125}Xe yang dihasilkan di kamar iradiasi ditunjukkan pada Gambar 3. Pada perhitungan ini digunakanampang lintang reaksi penangkapan neutron termal oleh ^{124}Xe sebesar 165 barn (10). Dari Gambar 3 diketahui bahwa setelah iradiasi selama 24 jam, ^{125}Xe terbentuk sebanyak 927 Ci. Selanjutnya ^{125}Xe ini dipindahkan ke dalam botol peluruhan untuk mendapatkan ^{125}I hasil dari peluruhannya. Perubahan radioaktivitas ^{125}Xe dan ^{125}I di dalam botol peluruhan ditunjukkan pada Gambar 4.

Dari gambar 4 diketahui bahwa radioaktivitas ^{125}I meningkat tajam pada saat awal. Peningkatan radioaktivitas ^{125}I mencapai puncak maksimum pada 4,6 hari sebesar 10,45 Ci. Pada saat puncak ini, laju pembentukan ^{125}I sama dengan laju peluruhannya. Setelah itu, laju peluruhan lebih cepat dari laju pembentukan sehingga radioaktivitas ^{125}I mengalami penurunan

seiring dengan waktu.



Gambar 4. Hasil perhitungan radio Aktivitas ^{125}Xe dan ^{125}I pada saat peluruhan ^{125}Xe menjadi ^{125}I di dalam botol peluruhan.

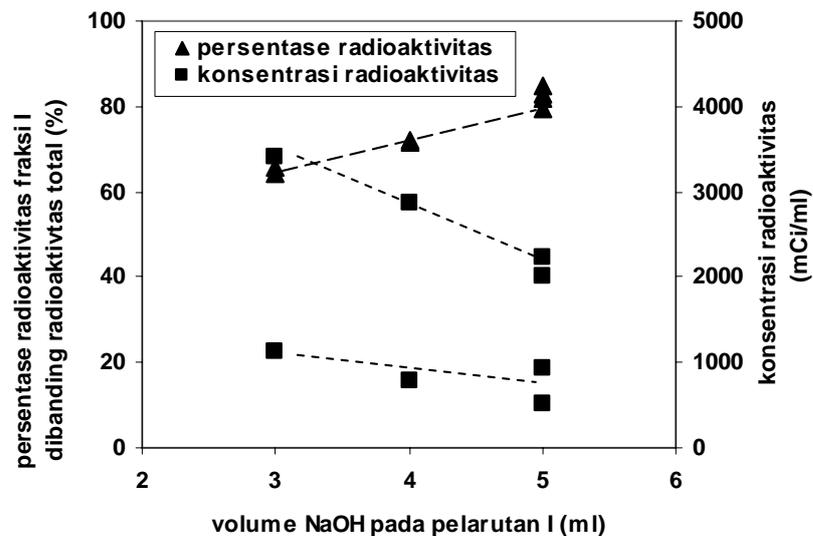
Pada Gambar 4, penurunan radioaktivitas ^{125}I tersebut tidak terlihat dengan jelas karena umur paro yang panjang yaitu 59,4 hari. Setelah 7 hari peluruhan, radioaktivitas ^{125}I sebesar 10,27 Ci. Hasil dari uji produksi ke-1 sampai dengan ke-4 mendekati hasil perhitungan teoritis dengan perbedaan kurang dari 10%.

Perbedaan antara hasil uji produksi dan perhitungan teoritis ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya adalah variasi fluks neutron di kamar iradiasi, perbedaan tingkat kesempurnaan pelarutan ^{125}I dari botol peluruhan serta akurasi pengukuran volume saat pengambilan sampel pada saat pengukuran. Pada perhitungan ini digunakan nilai rerata fluks neutron di posisi S1. Nilai fluks neutron sesungguhnya pada saat iradiasi dapat sedikit lebih besar atau lebih kecil bergantung pada komposisi bahan bakar dan tingkat serapan neutron dari bahan yang diiradiasi di dalam teras reaktor pada saat tersebut.

Dari hasil perhitungan dapat diketahui waktu peluruhan ^{125}Xe saat radioaktivitas ^{125}I mencapai nilai maksimum. Dari perhitungan menggunakan data sasaran

pada Gambar 4 dan hasil penurunan secara matematis menggunakan persamaan 3 diketahui bahwa nilai radioaktivitas ^{125}I mencapai maksimum pada saat peluruhan selama 4,6 hari. Namun, pada saat pengoperasian fasilitas, peluruhan dilakukan selama 7 hari. Hal ini dilakukan dengan pertimbangan keselamatan radiasi. Pada saat peluruhan selama 4,6 hari, radioaktivitas ^{125}Xe masih sebesar 10,1 Ci. Radioisotop ^{125}Xe memancarkan radiasi hasil anihilasi positron dan elektron sebesar 511 keV. Pada penyiapan pelarutan, perlu dilakukan penanganan botol peluruhan dengan membuka perisai timbal. Radiasi dari ^{125}Xe ini memiliki daya tembus yang tinggi sehingga memberikan paparan ke lingkungan yang besar jika hanya ditahan oleh dinding botol peluruhan berbahan SS316 setebal 5 mm. Setelah 7 hari peluruhan, radioaktivitas ^{125}Xe telah berkurang menjadi 0,94 Ci sehingga paparan ke lingkungan telah mengecil. Radioisotop ^{125}I memancarkan radiasi gamma dengan energi rendah sebesar 35,5 keV. Radiasi gamma serendah ini hampir tidak menembus dinding botol peluruhan dari SS316 setebal 5 mm.

Hasil pelarutan menggunakan NaOH 0,005 N menunjukkan bahwa volume larutan NaOH yang digunakan untuk pelarutan pertama berpengaruh pada radioaktivitas yang dihasilkan pada pelarutan pertama. Pada uji produksi ini digunakan NaOH dengan volume 3, 4 dan 5 mL pada pelarutan pertama. Korelasi antara volume NaOH yang digunakan dan persentase radioaktivitas ^{125}I yang berhasil dikeluarkan pada larutan 1 ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan antara volume NaOH yang digunakan pada pelarutan I dengan persentase radioaktivitas fraksi I dan konsentrasi radioaktivitasnya.

Pada Gambar 5 ditunjukkan bahwa pada saat pelarutan menggunakan NaOH sebanyak 3 mL, larutan pertama diperoleh 64,3 dan 65,6 % dari total radioaktivitas. Pada saat volume NaOH ditingkatkan menjadi 4 mL, persentase meningkat menjadi 71,3 dan 71,9%. Sedangkan saat digunakan 5 mL, persentase larutan I sebesar 81,7, 84,6, 79,6 dan 82,6%. Jadi semakin besar volume NaOH yang digunakan, semakin besar pula persentase yang dapat dilarutkan pada pelarutan pertama. Namun, pada Gambar 5 tersebut ditunjukkan pula bahwa semakin besar pelarut yang digunakan, konsentrasi radioaktivitas yang diperoleh pun semakin kecil. Penurunan konsentrasi tersebut terlihat pada uji produksi pertama sampai dengan ke-4 pada saat radioaktivitas total sekitar 9 Ci maupun pada uji produksi ke-5 sampai dengan ke-8 pada saat radioaktivitas total sekitar 4 Ci.

Dari hasil pelarutan ini dapat direkomendasikan bahwa untuk radioaktivitas besar, jumlah pelarut dapat digunakan dalam jumlah yang besar karena konsentrasi radioaktivitas tetap akan tinggi. Namun, jika total radioaktivitas rendah, pelarut digunakan seminimal mungkin untuk mendapatkan konsentrasi radioaktivitas yang tinggi sehingga memenuhi persyaratan yang diperlukan dengan mengorbankan total radioaktivitas pada pelarutan pertama.

Konsentrasi radioaktivitas pada uji produksi 1 sampai dengan 8 untuk hasil pelarutan 1 sampai dengan 3 ditunjukkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 diketahui bahwa dari pelarutan 1, konsentrasi maksimum yang pernah dihasilkan adalah 3410 mCi/mL pada uji produksi pertama. Pada uji produksi ke-2 sampai dengan ke-4 diperoleh konsentrasi antara 2000 – 3000 mCi/mL. Pada uji produksi ke-6 diperoleh 1225 mCi/mL sedangkan pada uji produksi ke 5, 7

dan 8 diperoleh konsentrasi radioaktivitas kurang dari 1000 mCi/mL.

Pada uji produksi ini telah dilakukan pula evaluasi kemurnian radionuklida yang diperoleh. Uji produksi ini menghasilkan ^{125}I dengan kemurnian radionuklida lebih dari 99,9%. Pengotor radionuklida yang terkandung di dalamnya berupa ^{126}I dengan umur paro 13,1 hari. Evaluasi kemurnian radionuklida secara rinci telah dipublikasikan sebelumnya (12).

Tabel 2. Konsentrasi Radioaktivitas pelarutan 1, 2 dan 3 dari uji produksi ke-1 sampai dengan ke-8

Uji produksi	Konsentrasi radioaktivitas ^{125}I (mCi/mL)		
	pelarutan 1	pelarutan 2	pelarutan 3
1	3410	763	166
2	2004	304	71
3	2865	936	125
4	2224	317	77
5	789	135	80
6	1225	263	61
7	934	151	31
8	504	92	28

4. KESIMPULAN

Telah dilakukan uji produksi ^{125}I dengan target xenon-124 diperkaya 82,4% sebanyak 0,0223 mol sebanyak 8 kali. Radioaktivitas total dari uji produksi ke-1 sampai dengan ke-8 pada saat pelarutan adalah 9541, 9801, 11239, 9458, 3293, 3735, 4693 dan 2744 mCi. Radioaktivitas hasil dari iradiasi pertama sampai dengan ke-4 mendekati hasil perhitungan secara teoritis yang sebesar 10,27 Ci. Rerata persentase radioaktivitas dari pelarutan pertama sebesar 65,1%, 71,5% dan 82,6% untuk volume pelarut NaOH masing masing sebesar 3 mL, 4 mL dan 5 mL. Konsentrasi radioaktivitas maksimum yang pernah

dicapai adalah 3410 mCi/mL pada pelarutan pertama dari uji produksi pertama.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Batan Teknologi atas kerja sama yang diberikan dalam pelaksanaan uji produksi Iodium-125.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Inoue T, Hayakawa K, Shiotari H, Takada E and Torikoshi M. Economic scale of utilization of radiation (III): Medicine, Journal of Nuclear Science and Technology, 2002, Vol 39:1114-1119.
- Widayati P, Ariyanto A, Yunita F, Sutari. Optimasi rancangan assay kit IRMA CA-125, Jurnal Radioisotop dan Radiofarmaka, 2006, Vol 9: 1-12.
- Antipas V, Dale RG, Coles IP. A theoretical investigation into the role of tumor radiosensitivity, clonogen repopulation, tumor shrinkage and radionuclide RBE in permanent brachytherapy implants of ^{125}I and ^{103}Pd , Physics in Medicine and Biology, 2001, Vol 46: 2557-2569.
- Sedelnikova OA., Panyutin IG, Thierry AR and Neumann RD. Radiotoxicity of Iodine-125-Labeled Oligodeoxyribonucleotides in Mammalian Cells, The Journal of Nuclear Medicine, 1998, Vol. 39: 1412-1418.
- Karhadkar CG. Design review and safety assessment of the xenon irradiation in tray rods, Proceeding of the IAEA Meeting on Irradiation Technology

-
- and Radioisotope Production, Jakarta, 2005.
 6. Saitoh N, et al. Handbook of Radioisotope, Maruzen, Tokyo, 1996.
 7. Soenarjo S, Tamat SR, Suparman I and Purwadi B. RSG-GAS based radioisotopes and sharing program for regional back up supply, Jurnal Radioisotop dan Radiofarmaka, 2003, Vol 6:33-43.
 8. Anonymous. Manufacturing manual of iodine-125, Medipysics, New York, 1985.
 9. Anonymous. Iodine-125 handling precaution, Perkin Elmer, New York, 2007.
 10. Japan Radioisotope Association. Note Book of Radioisotope, Maruzen, Tokyo, 1990.
 11. Awaludin R. Penggunaan ulang xenon pada produksi iodine-125, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2006: 24-28
 12. Awaludin R. dkk. Evaluasi kemurnian radionuklida pada uji produksi iodine-125 menggunakan target xenon diperkaya, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2008:146-151.

