
OPTIMASI pH ALUMINA dan ^{99}Mo DALAM PEMBUATAN GENERATOR $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ BERBASIS MoO_3 ALAM

Sulaiman, Yono Sugiharto, Chairuman, Gatot Setiawan, Adang Hardi Gunawan

Pusat Teknologi Radioisotop dan Radiofarmaka – BATAN,

Kawasan Puspiptek Serpong, Gd.11 Tangerang Selatan Banten 15314

Email: sulaiman@batan.go.id

(Naskah diterima: 15-03-2018, Naskah direvisi: 18-05-2018, Naskah disetujui: 01-06-2018)

ABSTRAK

OPTIMASI pH ALUMINA dan ^{99}Mo DALAM PEMBUATAN GENERATOR $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ BERBASIS MoO_3 ALAM. Alumina sebagai bahan penyerap telah lama digunakan untuk radioisotop ^{99}Mo pada generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ penghasil $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang banyak digunakan di kedokteran nuklir untuk keperluan diagnosa. Selama ini alumina digunakan untuk penyerapan ^{99}Mo yang diperoleh dari bahan fisi ^{235}U . Adanya pembatasan penggunaan matriks bahan fisi ^{235}U maka alternatif lain untuk memperoleh ^{99}Mo dengan menggunakan MoO_3 alam yang diiradiasi di reaktor nuklir. Radioisotop ^{99}Mo yang dihasilkan dari reaksi ini memiliki sifat tidak bebas pengemban sebagaimana halnya ^{99}Mo dari hasil fisi, karena tidak semua MoO_3 yang diiradiasi teraktivasi menjadi ^{99}Mo . Pada aplikasi generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ berbasis MoO_3 alam dengan menggunakan kolom alumina, perlu diketahui pH alumina yang optimal dalam penyerapan ^{99}Mo , dan juga pH ^{99}Mo . Pada penelitian ini digunakan tiga variasi kolom generator berbasis alumina yaitu alumina asam, alumina netral, dan alumina basa. Bahan matriks ^{99}Mo juga dilakukan tiga variasi pH yaitu larutan ^{99}Mo dengan pH 4, larutan ^{99}Mo dengan pH 7, dan larutan ^{99}Mo dengan pH 8. Generator dielusi dengan larutan salin dan diamati setiap hari selama 3 hari dan diteruskan setelah dua hari berikutnya selama 2 hari. Penyerapan ^{99}Mo dari MoO_3 alam oleh material alumina memberikan hasil penyerapan terbaik pada penggunaan alumina asam dengan larutan ^{99}Mo pada pH 4. Dari ketiga variasi pH larutan Mo yang memberikan yield $^{99\text{m}}\text{Tc}$ terbaik adalah pada penggunaan larutan ^{99}Mo dengan pH 4. Kolom yang memberikan ^{99}Mo *breakthrough* terkecil adalah di kolom alumina asam terutama menggunakan larutan ^{99}Mo dengan pH 4. Dengan demikian, untuk menyerapkan ^{99}Mo dari Mo alam dapat digunakan alumina asam dengan menggunakan larutan ^{99}Mo pada pH 4..

Kata kunci: ^{99}Mo , alumina, kolom, pH, *yield*.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF ALUMINA and ^{99}Mo pH IN THE PREPARATION OF $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ GENERATOR BASED ON NATURAL MoO_3 ; Alumina material has long been used for ^{99}Mo radioisotope adsorbent in the $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator. The $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator produces $^{99\text{m}}\text{Tc}$ radioisotope which is used for the diagnostic purpose in nuclear medicine. To date, alumina is used to adsorb ^{99}Mo obtained from fission reaction of ^{235}U . The restriction of the use of fission ^{235}U leads to the find of an alternative ^{99}Mo . The alternative of ^{99}Mo production is obtained from natural MoO_3 which is irradiated by thermal neutron in the nuclear reactor. The ^{99}Mo radioisotope produced from this reaction has no carrier-free properties. This is due to the abundance of natural MoO_3 is 24.13%. In the $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator based on natural MoO_3 by using alumina column, it is necessary to know the alumina type for optimum ^{99}Mo adsorption, as well as pH of ^{99}Mo . In this study, there were used three variations of alumina-based generator column namely acid, neutral, and basic alumina. The ^{99}Mo solution used in this study was also performed three pH: pH 4, pH 7, and pH 8 of the ^{99}Mo solution. The generator eluted and observed daily for 3 days and continued after the next two days for 2 days. The optimum adsorption of ^{99}Mo from natural MoO_3 by alumina material was given in the use of acidic alumina with the pH 4 of the ^{99}Mo solution. Among the three pH variation of the ^{99}Mo solution, the ^{99}Mo solution of pH 4 gives the highest of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yield. The column with the smallest ^{99}Mo breakthrough is given by acidic alumina column using the ^{99}Mo solution of pH 4. Thus, acidic alumina column can be used as an adsorbent to adsorb natural ^{99}Mo .

Keywords: ^{99}Mo , alumina, column, ^{99}Mo , pH.

dibandingkan dengan anion TcO_4^- pada penyerap alumina asam[10].

Meskipun kapasitas adsorpsi alumina untuk anion MoO_4^{2-} rendah (<10mgMo/g), kandungan Mo yang sangat rendah dalam larutan ^{99}Mo (0,1mg Mo per Ci ^{99}Mo), penting desain sistem *recovery* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ berbasis alumina harus menunjukkan baik efisiensi elusi tinggi (biasanya >85%) dan minimal kandungan lolosan ^{99}Mo (<0,015%)[10]

Kualitas *eluat* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dalam bentuk larutan injeksi natrium pertechnetat ($\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$) ditentukan dengan mengacu pada US Pharmacopeia, yaitu: larutan harus steril dan jernih, memiliki pH antara 4, 5-7, 5, kemurnian radiokimia $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ harus lebih besar dari 95%, kemurnian radionuklida / kandungan lolosan ^{99}Mo tidak lebih dari 0,15 $\mu\text{Ci Mo/mCi }^{99\text{m}}\text{Tc}$, kemurnian kimia maupun kandungan alumina tidak lebih dari $\leq 10 \mu\text{g/mL}$ [11].

Penentuan efisiensi penyerapan ditentukan dengan persamaan (1) sedangkan untuk besaran *yield* elusi ditentukan dengan persamaan (2)[5].

$$\text{Efisiensi (\%)} = \frac{\text{Aktivitas } ^{99}\text{Mo}}{\text{Aktivitas } ^{99}\text{Mo awal}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Yield elusi (\%)} = \frac{\text{Aktivitas } ^{99\text{m}}\text{Tc Hasil elusi}}{\text{Aktivitas } ^{99\text{m}}\text{Tc teoritis}} \times 100 \quad (2)$$

Pada makalah ini dibahas tentang optimasi penyerapan meliputi parameter pH alumina dan pH ^{99}Mo dalam pembuatan generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ berbasis MoO_3 alam. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan variasi terhadap pH larutan ^{99}Mo yaitu pH 4, pH 7 dan pH 8. Bahan alumina yang digunakan yaitu alumina dengan pH asam (pH 3,5-4,5), pH netral (pH 6,8-7,8), dan pH basa (pH 8,5-10,5).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pH dari alumina dan pH ^{99}Mo pada penyerapan ^{99}Mo aktivasi oleh alumina. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat diperoleh pH optimal

penggunaan alumina sebagai bahan penyerap ^{99}Mo aktivasi berbasis MoO_3 alam, sebagai langkah awal untuk penentuan optimasi penyerapan dari alumina yang akan digunakan pada generator $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$.

METODOLOGI

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahan target molibdenum oksida (MoO_3) alam. Target MoO_3 diaktivasi di reaktor serbaguna G.A. Sewabessy untuk mendapatkan radioisotop ^{99}Mo . Target dilarutkan dengan NaOH 4 M, dan untuk mendapatkan pH yang diinginkan digunakan HCl dan NaCl 0,9% sebagai larutan pengelusi.

Larutan radioisotop ^{99}Mo disiapkan dalam tiga *vial* masing masing sebanyak 2050 μL , kemudian ditambahkan larutan HCl 6 N sedikit demi sedikit sehingga diperoleh pH larutan menjadi 4, 7 dan 8.

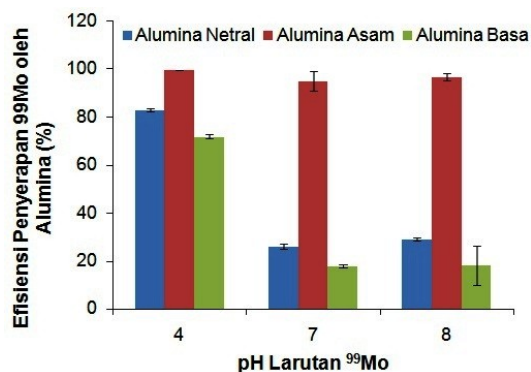
Alumina (asam, netral dan basa) masing masing ditimbang sebanyak 5 g, kemudian dimasukkan ke dalam kolom (18 kolom) setiap variasi larutan ^{99}Mo pH 4, 7, dan 8 dibuat dengan cara duplo ($n=2$). Larutan ^{99}Mo sebanyak 300 μL (sama dengan 75 mg Mo) dalam larutan ^{99}Mo dengan pH 8 dimasukkan kedalam kolom alumina asam, netral, dan basa (variasi larutan ^{99}Mo pH 8). Larutan ^{99}Mo sebanyak 375 μL (sama dengan 75 mg Mo) dalam larutan ^{99}Mo dengan pH 7 dimasukkan kedalam kolom alumina asam, netral, dan basa (variasi larutan ^{99}Mo pH 7). Larutan ^{99}Mo sebanyak 440 μL (sama dengan 75 mg Mo) dalam larutan ^{99}Mo dengan pH 4 dimasukkan kedalam kolom alumina asam, netral dan basa (variasi larutan ^{99}Mo pH 4).

Kolom dielusi dengan 10 mL NaCl 0,9% dan ditampung dalam *vial* 10 mL. Larutan hasil elusi diukur aktivitas $^{99\text{m}}\text{Tc}$ pada *dial* radionuklida $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yaitu 33,6 dan ^{99}Mo yang lolos pada *dial* 180 menggunakan alat *Dose calibrator (Atomlab 100 Plus)*. Pengukuran aktivitas ^{99}Mo yang lolos dari kolom diukur dengan alat *Dose calibrator* menggunakan wadah berupa kontainer

khusus. Kolom selanjutnya dielusi setiap hari menggunakan salin 0,9% selama 3 hari dan diteruskan setelah dua hari berikutnya selama 2 hari

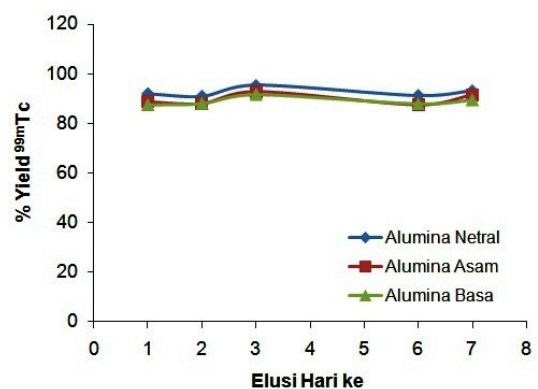
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penyerapan ^{99}Mo oleh kolom alumina ditentukan berdasarkan perbedaan aktivitas ^{99}Mo yang dimasukkan ke dalam kolom dengan aktivitas ^{99}Mo yang lolos elusi atau pencucian kolom. Waktu akhir pencucian kolom, ditentukan sebagai waktu awal (t_0) pertumbuhan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dalam kolom. Efisiensi penyerapan ^{99}Mo oleh kolom alumina untuk variasi pH larutan ^{99}Mo dan pH alumina yang digunakan untuk penyerapan ditampilkan pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2 efisiensi penyerapan ^{99}Mo terbesar dari tiga variasi alumina netral, asam, dan basa diperoleh pada kolom alumina asam. Alumina asam dapat menyerap ^{99}Mo terbanyak dari tiga variasi pH larutan ^{99}Mo yaitu $99,72 \pm 0,01\%$ (^{99}Mo pH 4), $99,72 \pm 0,01\%$ (^{99}Mo pH 7), dan $96,80 \pm 1,59\%$ (^{99}Mo pH 8). Dari larutan ^{99}Mo yang digunakan ^{99}Mo terserap oleh alumina paling banyak adalah larutan ^{99}Mo pH 4 yaitu jumlah ^{99}Mo terserap alumina netral $82,99 \pm 0,85\%$, alumina asam $99,72 \pm 0,01\%$, dan alumina basa $72,01 \pm 0,76\%$. Alumina asam dan larutan ^{99}Mo pH 4 memberikan hasil penyerapan yang terbaik.



Gambar 2. Efisiensi penyerapan ^{99}Mo oleh alumina (Al_2O_3)

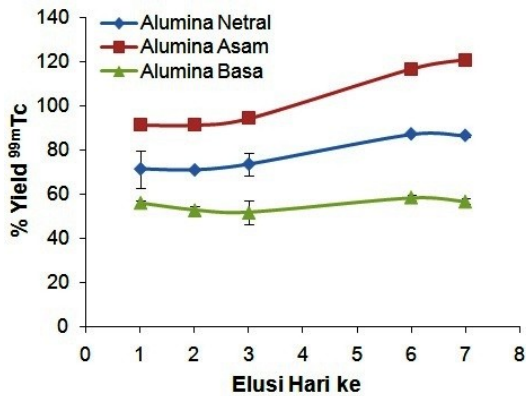
Hasil elusi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang berasal dari larutan ^{99}Mo pH 4 dengan variasi alumina netral, asam, dan basa ditampilkan pada Gambar 3. Gambar 3 memperlihatkan kecenderungan hasil elusi dari ke 3 variasi kolom terlihat sama dan % *yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang tertinggi untuk penggunaan larutan ^{99}Mo pH 4 adalah pada kolom alumina netral. Hasil elusi dari ke tiga kolom tersebut dihari ke 6 dan ke 7 terlihat sama yaitu tidak ada peningkatan % *yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$.



Gambar 3. Hasil elusi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ menggunakan larutan ^{99}Mo pada pH 4.

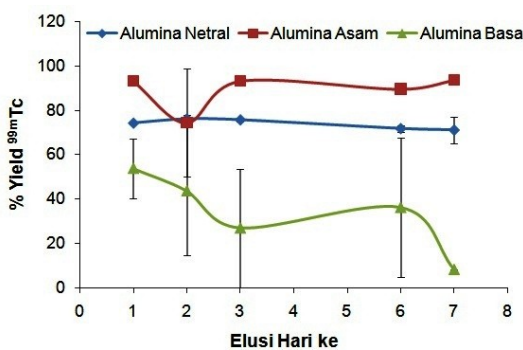
Hasil elusi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang berasal dari larutan ^{99}Mo pH 7 dengan variasi alumina netral, asam, dan basa ditampilkan pada Gambar 4. Gambar 4 memperlihatkan %*yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ tertinggi yaitu pada penggunaan kolom alumina asam, berikutnya pada kolom alumina netral dan paling rendah pada kolom alumina basa. Hasil elusi dari ke tiga kolom tersebut pada hari ke 6 dan ke 7 terlihat sama yaitu nilai *yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ meningkat dari 94,5% menjadi 116% hari ke 6, dan 120% hari ke 7 pada kolom alumina asam, dari 73% menjadi 87% hari ke 6 dan 86% hari ke 7 pada kolom alumina netral, dan dari 51% menjadi 58% hari ke 6 dan 56% hari ke 7 pada kolom alumina basa. Bahkan untuk kolom alumina asam mencapai lebih dari 100%. Diduga pada kondisi ini $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang terbentuk didalam kolom terlarut sempurna dan terbawa seluruhnya oleh larutan salin saat elusi, termasuk $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang belum habis

meluruh menjadi ^{99}Tc sebab telah dua hari terakumulasi dalam kolom karena tidak dilakukan elusi.



Gambar 4. Hasil elusi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ menggunakan larutan ^{99}Mo pada pH 7.

Hasil elusi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang berasal dari larutan ^{99}Mo pH 8 dengan variasi alumina netral, asam, dan basa ditampilkan pada Gambar 5.



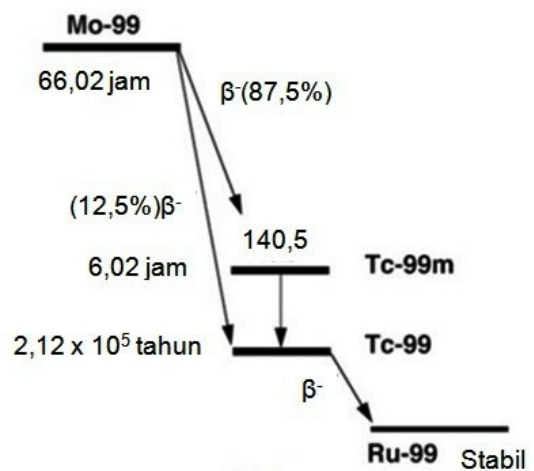
Gambar 5. Hasil elusi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ menggunakan larutan ^{99}Mo pada pH 8

Gambar 5 memperlihatkan kecenderungan hasil elusi dari ke 3 variasi kolom terlihat bervariasi dan % *yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang tertinggi diperoleh pada penggunaan larutan ^{99}Mo dengan pH 8 adalah pada kolom alumina asam, namun besaran ini terlihat berfluktuasi terlebih lagi alumina basa sedangkan pada alumina netral memperlihatkan % *yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ hampir sama. Hasil elusi dari ke tiga kolom tersebut pada hari ke 6 dan ke 7 terlihat berbeda antara satu sama lain. Hal ini diduga pada penggunaan larutan ^{99}Mo pH 8, semakin

besar pH alumina, semakin besar kecenderungan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ tertahan dalam kolom saat elusi.

Dari ketiga penggunaan variasi pH larutan ^{99}Mo Gambar 3-5 hanya pada penggunaan pH 7 terlihat peningkatan %*yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ secara signifikan yang terjadi pada elusi hari ke 6 dan ke 7 seperti yang terlihat pada Gambar 4, namun pada penggunaan pH 4 dan 8 tidak terlihat peningkatan %*yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 5. Dari keadaan tersebut diduga alumina lebih bersifat melepaskan ^{99}Tc pada penggunaan larutan ^{99}Mo pH 7 dibanding larutan lainnya.

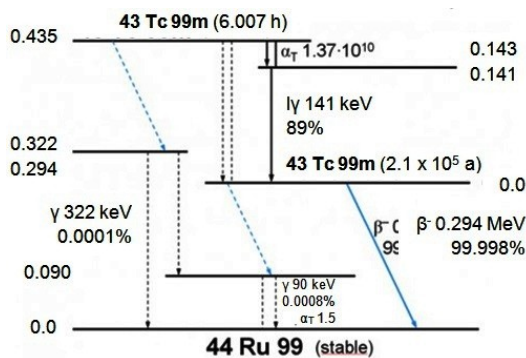
Teknesium-99 adalah hasil peluruhan ^{99}Mo . Terdapat dua jenis peluruhan ^{99}Mo yaitu 87,5% meluruh menjadi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ *metastabil* dengan memancarkan sinar β^- dan sinar γ dan sisanya langsung meluruh menjadi ^{99}Tc . Radioisotop $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dari ^{99}Mo kemudian meluruh menjadi ^{99}Tc dan akhirnya ^{99}Tc akan menjadi stabil menjadi ^{99}Ru seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6[12][13].



Gambar 6. Skema peluruhan ^{99}Mo [12][13].

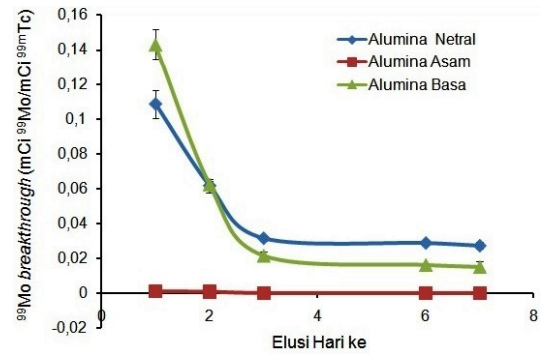
Saat proses peluruhan ^{99}Tc menuju ^{99}Ru yang stabil memancarkan 99,998% sinar β^- lemah dengan energi 0,294 MeV dan 0,0008% sinar γ pada energy 90 keV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7[13]. Selama dua hari tidak dilakukan elusi, disamping $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang belum habis meluruh

menjadi ⁹⁹Tc dan dengan sendirinya ⁹⁹Tc telah terakumulasi dalam kolom dan elusi berikutnya ⁹⁹Tc akan ikut terbawa bersama ^{99m}Tc[12]. Teknesium-99m dan ⁹⁹Tc diperkirakan mempengaruhi hasil *yield* ^{99m}Tc yang diperoleh. Selain itu, ⁹⁹Tc juga biasanya mempengaruhi hasil penandaan saat digunakan untuk kit radiofarmaka karena mempunyai sifat kimia yang sama dengan ^{99m}Tc. Diduga sinar γ berenergi 90 keV yang dihasilkan dapat mempengaruhi hasil pengukuran pada saat penentuan aktivitas ^{99m}Tc. Belum diketahui dengan pasti apakah sinar β^- dengan energi 0,294 MeV menghasilkan *bremstahlung* saat berinteraksi dengan materi dan menambah hasil pengukuran aktivitas ^{99m}Tc. Pada penggunaan larutan ⁹⁹Mo dengan pH 4 dan 8 diduga ⁹⁹Tc yang terakumulasi tertahan dalam kolom seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 5. Hal ini perlu pembuktian lebih lanjut.



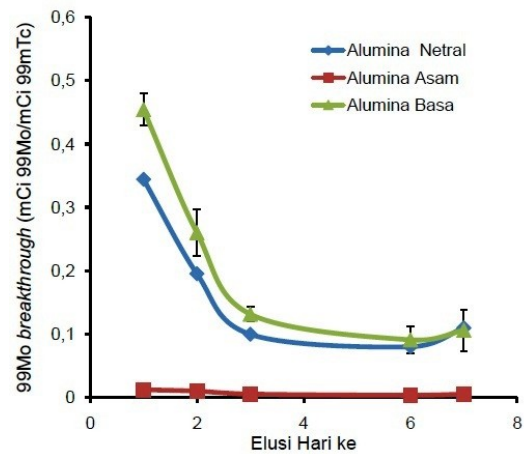
Gambar 7. Skema peluruhan ^{99m}Tc[12].

Besarnya ⁹⁹Mo yang lolos pada elusi ^{99m}Tc menggunakan larutan ⁹⁹Mo dengan pH 4 ditampilkan pada Gambar 8. Sedangkan untuk semua variasi alumina, radioisotop ⁹⁹Mo yang lolos jauh lebih kecil dibanding dengan larutan ⁹⁹Mo pH 7. Alumina pada kondisi asam menghasilkan lolosan ⁹⁹Mo terkecil. Pada alumina kondisi asam dengan larutan ⁹⁹Mo pH 4 terlihat tidak ada lolosan ⁹⁹Mo untuk hari ke 3 dan seterusnya. Grup OH dari alumina asam (-Al-OH[-Al]₂) lebih menyerap ion-ion MoO₄⁻².



Gambar 8. Lolosan ⁹⁹Mo pada elusi ^{99m}Tc menggunakan larutan ⁹⁹Mo dengan pH 4.

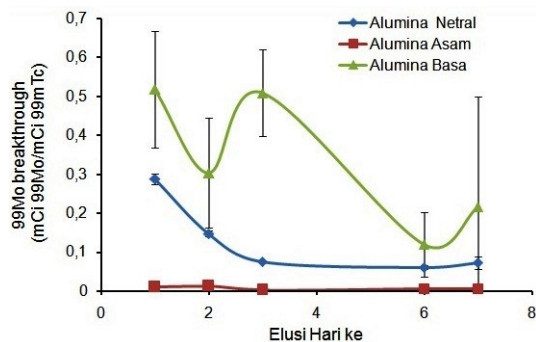
Aktivitas ⁹⁹Mo yang lolos (⁹⁹Mo *breakthrough*) saat elusi ^{99m}Tc menggunakan larutan ⁹⁹Mo pH 7 seperti terlihat pada Gambar 9. Radioisotop ⁹⁹Mo yang lolos terjadi paling kecil pada kolom alumina asam dan yang paling besar terjadi pada kolom alumina basa dan berikutnya pada alumina netral dan cenderung menurun untuk elusi hari berikutnya karena terjadi perubahan pH pada alumina dengan adanya proses elusi dengan salin.



Gambar 9. Lolosan ⁹⁹Mo pada elusi ^{99m}Tc menggunakan larutan ⁹⁹Mo dengan pH 7

Aktivitas ⁹⁹Mo yang lolos ditentukan berdasarkan perbandingan aktivitas ⁹⁹Mo yang lolos dengan aktivitas ^{99m}Tc yang diperoleh saat elusi. Aktivitas lolosan ⁹⁹Mo pada elusi ^{99m}Tc menggunakan larutan ⁹⁹Mo dengan pH 8 ditampilkan pada Gambar 10.

Lolosan ^{99}Mo yang terkecil pada variasi ini terjadi pada kolom alumina asam, tetapi lebih besar dibanding dengan variasi menggunakan larutan ^{99}Mo dengan pH 4.



Gambar 9. Lolosan ^{99}Mo pada elusi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ menggunakan larutan ^{99}Mo dengan pH 8

Lolosan ^{99}Mo maksimum yang diizinkan untuk $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang digunakan dalam kedokteran nuklir adalah $<1 \mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo}/\text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$ [12], sedangkan pada *Standards US Pharmacopeial* lolosan Mo harus $< 0,15 \mu\text{Ci } ^{99}\text{Mo}/\text{mCi } ^{99\text{m}}\text{Tc}$ [11]. Lolosan ^{99}Mo yang mendekati batas maksimum yang diizinkan terlihat pada penggunaan larutan ^{99}Mo dengan pH 4 dan alumina asam seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Agar lebih amannya perlu rekayasa penggunaan kolom alumina untuk menangkap lolosan ^{99}Mo yang dipasang secara seri ke kolom alumina pertama, sebagai mana yang telah dilakukan pada generator berbasis ZBM[8].

Dari ketiga variasi kolom (alumina netral, asam dan basa) yang memberikan hasil elusi $^{99\text{m}}\text{Tc}$ yang baik adalah menggunakan larutan ^{99}Mo dengan pH 4, larutan ^{99}Mo dengan pH 7 diduga kolom melepaskan ^{99}Tc , dan larutan ^{99}Mo dengan pH 8 diperoleh hasil yang bervariasi. Pada alumina basa diduga $^{99\text{m}}\text{Tc}$ tertahan dalam kolom dan pada alumina netral hasil elusi konstan.

Kolom yang memberikan lolosan ^{99}Mo terkecil terjadi pada kolom alumina asam terutama menggunakan larutan ^{99}Mo dengan pH 4. Dengan demikian ^{99}Mo diikat

paling kuat oleh alumina asam dengan larutan ^{99}Mo pada pH 4.

SIMPULAN

Penyerapan ^{99}Mo dari MoO_3 alam oleh material alumina memberikan hasil penyerapan terbaik pada penggunaan alumina asam dengan larutan ^{99}Mo pada pH 4. Dari ketiga variasi pH larutan Mo yang memberikan *yield* $^{99\text{m}}\text{Tc}$ terbaik adalah pada penggunaan larutan ^{99}Mo dengan pH 4. Kolom yang memberikan ^{99}Mo *breakthrough* terkecil adalah dikolom alumina asam terutama menggunakan larutan ^{99}Mo dengan pH 4. Dengan demikian, untuk menyerap ^{99}Mo dari Mo alam dapat digunakan alumina asam dengan menggunakan larutan ^{99}Mo pH 4.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada PTRR-BATAN yang telah memfasilitasi penelitian ini dan kepada Dra. Siti Darwati, M.Sc, Dr. Rohadi Awaludin, serta Marlina, M.Si yang telah membantu serta memberikan masukan dalam pembuatan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Mirjalili, L. Chuah, and H. Mohamad, "Effect of stirring time on synthesis of ultra fine $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ powder by a simple sol-gel method," *J. Ceram. Process. Res.*, vol. 12, no. 6, pp. 738–741, 2011.
- [2] A. Dash *et al.*, "Development of a $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator using alumina microspheres for industrial radiotracer applications," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 70, no. 1, pp. 51–58, 2012.
- [3] I. Saptiana *et al.*, "Optimasi penyerapan molibdenum-99 pada material berbasis zirkonium (MBZ)," in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Pendidikan Sains IX, Fakultas Sains dan Matematika*, 2014, pp. 615–620.
- [4] I. Saptiama, E. Sarmini, and R. Awaludin, "Pengembangan material berbasis zirkonium (MBZ)," *Semin. Nas.*

- SDM Teknol.*, no. VII November 2011, pp. 472–476.
- [5] U. N. Sholikhah, H. Lubis, E. Sarmini, H. Herlina, K. Wisnukaton, and K. Wisnukaton, "Zirconium polymer characteristic As $^{99}\text{Mo} / ^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator absorbent for diagnostic radiopharmaceuticals," *Widyariset*, vol. 2, no. 1, p. 17, 2016.
- [6] I. Saptiama *et al.*, "The use of sodium hypochlorite solution for (n , □ □) $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator based on zirconium-based material (ZBM)," *Atom Indones.*, vol. 41, no. 2, pp. 103–109, 2015.
- [7] S. V. Selivanova *et al.*, "Radioisotopic purity of sodium pertechnetate $^{99\text{m}}\text{Tc}$ produced with a medium-energy cyclotron: implications for internal radiation dose, image quality, and release specifications," *J. Nucl. Med.*, vol. 56, no. 10, pp. 1600–1608, 2015.
- [8] I. Saptiama, E. Lestari, Sarmini, H. Lubis, Marlina, and A. Mutalib, "Development of $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator system for production of medical radionuclide $^{99\text{m}}\text{Tc}$ using a neutron-activated ^{99}Mo and zirconium based material (ZBM) as its adsorbent," *Atom Indones.*, vol. 42, no. 3, pp. 115–121, 2016.
- [9] I. Saptiama and E. Sarmini, "Aktivasi neutron dari molibdinum alam untuk memperoleh teknesium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)," *Urania*, vol. 22, no. No.2, pp. 121–132, 2016.
- [10] V.S.Le, " $^{99\text{m}}\text{Tc}$ generator development: up-to-date $^{99\text{m}}\text{Tc}$ recovery technologies for increasing the effectiveness of ^{99}Mo utilisation van," *Sci. Technol. Nucl. Install.*, vol. 2014, pp. 1–41, 2014.
- [11] Marlina, Sriyono, L. E. Abidin, "Desain dan performa prototipe generator ^{99}Mo ," *J. Kim. dan Kemasan*, vol. 38, no. 2, pp. 93–102, 2016.
- [12] I. Zolle, "Performance and Quality Control of the $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ Generator," *Technetium-99m Pharm. Prep. Qual. Control Nucl. Med.*, pp. 77–93, 2007.
- [13] www.nucleonica.com."Online available <https://www.nucleonica.com/wiki/index.php?title=File%3ATc99DS.png> [accessed:08-Aug-2017]